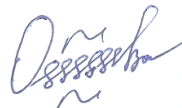


**ДОНИШГОҲИ ДАВЛАТИИ ОМУЗГОРИИ ТОҶИКИСТОН
БА НОМИ САДРИДДИН АЙНӢ**

Бо ҳукуки дастнавис



ТДУ: 546.1+546.722

ТКБ: 24.1+24.13

О-48

ОЛИМҚОНОВА Нилуфар Ваҳобҷонова

**ҲАЛШАВАНДАГӢ ВА ФАЗАҲОСИЛШАВИИ СИСТЕМАИ
 Na^+ , Ca^{2+} , $\text{Al}^{3+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, HCO_3^- - H_2O ДАР ҲАРОРАТҲОИ 273 ВА 298 К**

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т И

диссертация барои дарёфти дараҷаи илмӣ
доктори фалсафа (PhD) – доктор аз рӯи ихтисоси 6D060600 – Химия
(6D060601 – Химияи ғайриорганикӣ)

ДУШАНБЕ – 2025

Диссертатсия дар лабораторияи илмӣ-таҳқиқотии «Омӯзиши системаҳои бисёркомпонента бо усули транслятсияи ба номи Арбоби илм ва техникаи Тоҷикистон, доктори илмҳои химия, профессор Лутфулло Солиев»-и назди кафедраи «Химияи умумӣ ва ғайриорганикӣ» - и Донишгоҳи давлатии омӯзгории Тоҷикистон ба номи Садриддин Айни иҷро карда шудааст.

Роҳбари илмӣ:

Жумаев Маъруфжон Тағоймуротович,
номзади илмҳои химия, дотсент

Муқарризони расмӣ:

Абулхаев Владимир Чалолович,
доктори илмҳои химия, профессор, мудири озмоишгоҳи «Химияи пайвастагиҳои гетеросиклӣ» - и Институти химияи ба номи В.И Никитини Академияи миллии илмҳои Тоҷикистон;

Раҳимов Фаррух Қаюмович,
номзади илмҳои химия, дотсент, мудири кафедраи «Металлургия» -и Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи М.С. Осимӣ

Муассисаи пешбар:

Муассисаи давлатии «Пажӯҳишгоҳи илмию таҳқиқотии металлургия»-и Ҷамъияти саҳҳомии кушодаи «Ширкати Алюминийи Тоҷик»

Ҳимояи диссертатсия «18» сентябри 2025 с. соати 13⁰⁰ дар ҷаласаи Шурои диссертатсионии 6D. КОА – 010 дар назди Донишгоҳи миллии Тоҷикистон баргузор мегардад.

Суроға: 734025, ш. Душанбе, хиёбони Рудақӣ, 17. E-mail: nazira@mail.ru

Бо мӯҳтавои диссертатсия тавассути сомонаи www.tnu.tj ва дар китобхонаи марказии Донишгоҳи миллии Тоҷикистон бо нишони 734025, ш. Душанбе, хиёбони Рудақӣ, 17 шинос шудан мумкин мебошад.

Автореферат «__» _____ соли 2025 фиристода шуд.

Котиби Шурои диссертатсионӣ,
номзади илмҳои химия, дотсент



Бекназарова Н.

ТАВСИФИ УМУМИИ КОР

Мубраияти мавзӯи таҳқиқот. Тараққӣ намудани саноати химиявиро бе истехсоли маводҳои нав ва коркарди ашёи хоми минералӣ тасаввур намудан имконнопазир аст. Чунки он ба таҳқиқи омӯзиши системаҳои дахлдори химиявӣ алоқаманд мебошад. Дар ин асос донишҷӯи қонуниятҳои муттақобилан таъсиркунии моддаҳои химиявӣ дар якҷоягӣ (омехтагӣ) тақозои замон буда, онҳоро усулҳои таҳлили замонавии физико-химиявӣ, ки академик Н.С. Курнаков ва шогирдону пайравони ӯ кашф ва пешниҳод намудаанд, меомӯзад. Чунин тарзи омӯзиши хосиятҳои системаҳои химиявӣ имконият фароҳам меоварад, ки табaddулотҳои дар онҳо ҷойдошта, хусусан табaddулотҳои фазагӣ, кристаллогидратҳои системаҳои химиявиро ташкилкунанда, ҳосилшавии моддаҳои нав ва дигар тағйиротҳои ба хосияти моддаҳо таъсиррасонанда бе ҷудо намуданашон омӯхта шавад ва қонуниятҳои дахлдори ин равандҳоро муайянкунанда муқаррар карда шавад.

Ашёҳои хоми минералӣ - ин маъданҳои ғоиданоке мебошанд, ки дар истехсолот истифода мешаванд ва барои саноат нақши муҳим доранд. Айни замон аксарияти ашёи хоми истехсолотро маъдан ташкил медиҳад.

Пас аз истихроҷи маъданҳо онҳо коркард шуда, дар баробари моддаҳои заруриро ба даст овардан, боз ҳамчун партов ҷудо карда мешаванд. Партовҳои саноатӣ бошанд, натиҷаи ногузири (хатмӣ) ҳар як истехсолот ва хатари ҷиддӣ ба муҳити зист буда, ҳар сол дар ҷаҳон якчанд миллиардҳо тонна ҷудо мешавад. Ҳол он ки партови як истехсолот барои дигараш ашёи хоми пурқиммат ба шумор рафта, коркарди такрорӣ на танҳо ба табиат камзарар аст, балки манбаи иловагии даромад ва боигарӣ низ мебошад.

Яке аз чунин саноатҳо дар Тоҷикистон заводи “Алюминийи Тоҷик” буда, партовҳои он майдонҳои ғоиданокро бекор ва муҳити зистро вайрон мекунанд. Ҳол он ки дар таркиби партовҳои мазкур мавҷудияти компонентҳои зарурӣ ба монанди фторидҳо, сульфатҳо, гидрокарбонатҳои карбонатҳои алюминий, калтсий, калий ва натрий мушоҳида шуда, коркарди такрорашон аз муҳимтаринҳо мебошанд. Бинобар ин муайянкунии фазаҳосилкунии Na^+ , Ca^{2+} , $\text{Al}^{3+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, $\text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$ дар ҳароратҳои 273 ва 298 К имкониятҳои шароити оптималии аз нав коркарди ашёи хом ва партовҳои моеъи саноати истехсоли алюминиро, ки иборат аз намакҳо, хусусан компонентҳои болозикр мебошанд, муайян мекунанд.

Дарачаи таҳқиқи мавзӯи илмӣ. Асосҳои таҳлили физико-химиявӣ, хусусан таҳлил ва таҳқиқи системаҳои химиявӣ аз ҷониби як қатор олимони ба роҳ монда шудааст, ки аз ҷумлаи онҳо Н.С. Курнаков, В.Н. Лодочников, В.П. Радишев, В.Я. Аносов, Д.С. Коржинский, Ф.М. Перелман, В.А. Жариков, В.И. Михеева, Я.Г. Горошенко, А.С. Трунин, Л.С. Солиев ва дигарон мебошанд.

Олимони номбурда таҳқиқотҳои илмиашонро дар системаҳои химиявии металлӣ, оксидӣ, намакӣ вобаста ба ҳарорати ғудозиш амалӣ намуда, омӯзиши мувозинатҳои фазагӣ ва ҳалшавандагӣ дар системаҳои химиявии обӣ-намакӣ аз ҷониби Горошенко Я.Г. ва Солиев Л. ба роҳ монда шудааст. Онҳо дар ин самт муайянсозии мувозинатҳои фазагӣ ва ҳалшавандагӣ дар системаи бисёркомпонентаи обӣ-намакии Na , K , Mg , $\text{Ca} \parallel \text{SO}_4$, $\text{Cl} - \text{H}_2\text{O}$ барои фосилаи ҳароратҳои 0-100 °C дар сатҳи панҷкомпонентагӣ ва ҳудуди майдонҳои кристаллизатсияҳои алоҳидаи он дар сатҳи шашкомпонентагӣ иҷро намуда, диаграммаҳои фазагӣ ва ҳалшавандагии системаи мазкурро сохта, фрагментатсияи фазаҳои алоҳидаи онро ба анҷом расонидаанд. Аммо, дар ҷараёни таҳлили адабиёт маълум гардид, ки системаи панҷкомпонентаи Na^+ , Ca^{2+} , $\text{Al}^{3+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, $\text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$ аз ҷониби муҳаққиқон умуман омӯхта нашуда, субсистемаҳои онро ташкилдиханда алалхусус дар сатҳи секомпонентагӣ аз 9 система 4 – тоаш: $\text{Na}^+ \parallel \text{SO}_4^{2-}$, $\text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$; $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, $\text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$; Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-} - \text{H}_2\text{O}$ ва Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$ қисман омӯхта шудааст.

Робитаи таҳқиқот бо барномаҳо (лоиҳаҳо) ва ё мавзӯҳои илмӣ. Кори диссертатсионӣ вобаста ба вазифаҳои ҳадафи чоруми стратегияи миллий, ки ба рушди саноати химиявӣ дар асоси ашёҳои хоми маҳаллӣ хусусан «Стратегияи миллии рушди Тоҷикистон дар давраи то соли 2030» ва вобаста ба он мутобиқи нақшаи лоиҳаи илмӣ-таҳқиқотии «Ҳалшавӣ ва кристаллизатсияи намакҳо дар системаи бисёркомпонентаи аз сулфатҳо, карбонатҳо, гидрокарбонатҳо, фторидҳои натрий, калий ва калсий ташкилёфта» рақами қайди давлатиаш (№ ҚД): 0119 ТҶ 00957) мебошад, ба иҷро расонида шудааст.

ТАВСИФИ УМУМИИ ТАҲҚИҚОТ

Мақсади асосии кори мазкур муайянсозии фазаҳосилшавӣ ва ҳалшавандагӣ дар системаи бисёркомпонентаи муовизаи обӣ-намакӣ иборат аз катионҳои натрий, калтсий, алюминий ва анионҳои сулфат, гидрокарбонат дар ҳароратҳои 273 ва 298 К ва омӯзиши параметрҳои концентратсионии фазаҳо дар шаклҳои геометрии майдонҳо, хатҳо ва нуқтаҳо мебошад.

Бо мақсади расидани диссертант ба ҳадафи дар наздаш гузошташуда чунин вазифаҳо пешбинӣ карда шудааст:

- омӯзиши ҳолати системаи панҷкомпонентаи таҳқиқшаванда ва зерсистемаҳои се ва чоркомпонентаи онро ташкилқунанда бо таҳқиқи фазаҳосилшавӣ ва сохтани диаграммаи сарбасти онҳо;
- мутобиқ ба меъёрҳои усули транслятсия пажӯиш бо истифодаи маълумотҳои комплекси фазавӣ дар системаҳои се-чоркомпонента ва фазаҳосилшавӣ дар системаи панҷкомпонента барои изотермаҳои 273 ва 298 К бо сохтани диаграммаҳои ҳолатӣ чиҳати муайян кардани ифодаҳои геометрӣ;
- таҳқиқи сатҳи ифодаҳои геометрӣ дар диаграммаҳои омӯхта ва сохташуда вобаста ба минтақаҳои кристаллизатсияи фазаҳои ҳолис (дар системаҳои чоркомпонента) ва ҳудуди кристаллизатсияи якҷояи 2 фаза (дар системаи панҷкомпонента) ва ба фрагментатсияшон;
- таҳқиқи эксперименталии қор ва натиҷагирӣ аз раванди ҳалшавандагӣ ва дар изотермаҳои 273 ва 298 К сохтани диаграммаҳои ҳолатии (ҳалшавандагӣ) системаҳои чоркомпонентаи таҳқиқшаванда;
- таҳияи схемаи принципалии технологияи тарзҳои ҷудокунии фазаҳои саҳти алоҳида дар асоси диаграммаҳои комплекси фазавӣ ва ҳолатии (ҳалшавандагии) зерсистемаҳои системаи бисёркомпонентаи химиявии таҳқиқшаванда.

Объекти таҳқиқоти илмӣ системаи бисёркомпонентаи Na^+ , Ca^{2+} , $\text{Al}^{3+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, HCO_3^- - H_2O , субсистемаҳои компонентнокиашон чори Na^+ , Ca^{2+} , Al^{3+} - SO_4^{2-} - H_2O ; Na^+ , Ca^{2+} , Al^{3+} - HCO_3^- - H_2O ; Ca^{2+} , $\text{Al}^{3+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, HCO_3^- - H_2O ; Na^+ , $\text{Al}^{3+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, HCO_3^- - H_2O ; Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, HCO_3^- - H_2O ва 9 системаҳои секомпонентаи дигар мебошанд.

Мавзӯи таҳқиқоти илмӣ кори диссертатсионӣ ҳалшавандагӣ ва фазаҳосилшавии системаи Na^+ , Ca^{2+} , $\text{Al}^{3+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, HCO_3^- - H_2O дар ҳароратҳои 273 ва 298 К мебошад.

Навгонии илмӣ диссертатсияи доктор (PhD) – и иҷрошуда дар он ба назар мерасад, ки:

- таҳқиқи вазъи ҳолатии системаи панҷкомпонента ва субсистемаҳои се-чоркомпонентаи онро ташкилқунанда ба роҳ монда шуда, диаграммаҳои фазаҳосилшавиашон сохта шудааст;
- бо истифодаи иттилоотҳои фазаҳосилшавии системаҳои се-чоркомпонента ва имконияти усули транслятсия, аввалин шуда фазаҳосилшавӣ дар субсистемаҳои таркибӣ ва системаи панҷкомпонента муайян карда шуда, теъдоди шаклҳои геометрии он ёфта шудааст;
- бо истифода аз диаграммаҳои сохташуда таҳқиқ ба роҳ монда шуда, ҳудуди майдонҳои кристаллизатсияи фазаҳои алоҳида (барои системаҳои чоркомпонента) ва

кристаллизатсияи якҷояи ду фаза (барои системаи панҷкомпонента) фрагментатсия кунонида шудааст;

- экспериманталӣ изотермаи ҳалшавандагии субсистемаҳо омӯхта шуда, аввалин маротиба таҳқиқ дар $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+}, \text{Al}^{3+}-\text{SO}_4^{2-}-\text{H}_2\text{O}$, $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+}||\text{SO}_4^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$ барои 273 ва 298 К амалӣ гардида, диаграммаҳои ҳолатӣ (ҳалшавандагӣ) сохта шудааст;

- аввалин маротиба дар асоси диаграммаи ҳолатии зерсистемаҳои системаи химиявии таҳқиқшаванда схемаи принципалии технологияи тарзҳои ҷудокунии фазаҳои саҳти алоҳида аз партовҳои моеъи саноатӣ алюминий пешниҳод карда шудааст.

Аҳамияти назариявӣ ва илмӣ-амалии таҳқиқоти зерин ин:

- параметрҳои оптималии муайяншудаи фазаҳосилшавӣ дар шаклҳои геометрии бо усули транслятсия муқарраргардида метавонанд ҳамчун маводи маълумотӣ истифода гардад;

- қонуниятҳои фазаҳосилшавӣ (комплекси фазагӣ) метавонанд ҳамчун асоси илмӣ ҷиҳати коркарди шароитҳои оптималии ашёи хоми табиӣ полиминералӣ ва аз ҷиҳати техникӣ мураккаб (партовҳои истехсолӣ), ки дорои сульфатҳо, карбонатҳо, гидрокарбонатҳои натрий, калтсий ва алюминий зарур мебошанд, истифода гардад.

Муқаррароти асосии кори диссертатсионӣ, ки барои химоя пешниҳод шудаанд, инҳоянд:

- вазъи омӯзиши системаи химиявии панҷкомпонентаи $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+}, \text{Al}^{3+}||\text{SO}_4^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$ ва системаҳои чор- ва секомпонентаи онро ташкилдиханда, дар изотермаҳои 273 ва 298 К;

- натиҷаҳои бо усули транслятсия муайяншудаи фазаҳосилшавии системаҳои чоркомпонентаи $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+}, \text{Al}^{3+}-\text{SO}_4^{2-}-\text{H}_2\text{O}$; $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+}, \text{Al}^{3+}-\text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$; $\text{Ca}^{2+}, \text{Al}^{3+}||\text{SO}_4^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$; $\text{Na}^+, \text{Al}^{3+}||\text{SO}_4^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$; $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+}||\text{SO}_4^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$ дар изотермаҳои 273 ва 298 К, инчунин сохтори диаграммаҳои онҳо;

- натиҷаҳои бо усули транслятсия муайяншудаи мувозинатҳои фазагии системаи панҷкомпонентаи $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+}, \text{Al}^{3+}||\text{SO}_4^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$ дар ҳароратҳои 273 ва 298 К, инчунин сохтори диаграммаҳои он;

- натиҷаҳои омӯзиши ҳалшавандагӣ дар нуқтаҳои нонвариантии субсистемаҳои $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+}, \text{Al}^{3+}-\text{SO}_4^{2-}-\text{H}_2\text{O}$ ва $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+}||\text{SO}_4^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$ изотермаҳои 273 ва 298 К, инчунин сохтори диаграммаҳои ҳолатии онҳо мебошанд.

Дарачаи эътимоднокии таҳқиқот. Эътимоднок будани натиҷаҳои илмӣ ба даст омадари усулҳои ҳозиразамони таҳлили физико-химиявӣ, апробатсияи онҳо дар форум, симпозиум, конференсияҳои сатҳҳои байналхалқию ҷумҳуриявӣ ва нашри мавод дар маҷаллаҳои илмӣ профилӣ исбот ва асоснок менамоянд.

Мутобиқати диссертатсияи доктор (PhD) ба шиносномаи ихтисоси илмӣ 6D.060601 – химияи ғайриорганикӣ.

Натиҷаҳои таҳқиқоти илмӣ дар бораи моддаҳои ғайриорганикӣ, ки мо ба даст овардем, ба талаботҳои умумии шиносномаи ихтисоси илмӣ 6D.060601 – химияи ғайриорганикӣ ҷавобгӯ аст.

Махсусан, зимни таҳқиқот муқаррар гардид, ки хусусиятҳои асосии ин моддаҳо, аз ҷумла рафтори онҳо бо моддаҳои дигар дар шароитҳои гуногун муайян гарданд. Ин ифодакунандаи алоқамандии таркиб, сохт ва хусусиятҳои ин моддаҳои ба ҳамдигар таъсиррасон мебошад, ки дар банҳои алоҳидаи шиноснома дарҷ гардидааст.

Саҳми шахсии муаллиф. Саҳми шахсии муаллиф аз таҳлили адабиёти мавҷуда, банақшагирӣ ва гузаронидани таҳқиқотҳои назариявӣ ва экспериманталӣ, коркард, ҷамъбаст ва таҳлили натиҷаҳои бадастомада, таҳияи хулосаҳо, инчунин, таҳия ва нашри мақолаҳои илмӣ иборат аст.

Тасвиб ва амалисозии натиҷаҳои кори диссертатсионии доктор (PhD).

Натиҷаҳои асосӣ ва муҳимтарини иҷрои рисолаи илмӣ мазкур дар конгрессҳои ҳарсолаи илмӣ-назариявӣ ҳаёати профессорон ва омӯзгорони Донишгоҳи давлатии омӯзгории Тоҷикистон ба номи С. Айни (Душанбе, 2019-2025); конференсияи байналхалқӣ «Экологобезопасные и ресурсосберегающие технологии и материалы» (Улан-Удэ, 2020); конференсияи байналхалқӣ «Проблемаҳои муосири саноати металлургӣ» (Душанбе, 2021); симпозиуми олимони ҷавон «Физико-химические методы в междисциплинарных экологических исследованиях» (Москва, 2021); «IV Байкальский материаловедческий форум» (Улан-Удэ, 2022); конференсияи байналхалқӣ «Рушди самтҳои нав дар химия ва технологияи химиявӣ» (Душанбе, 2023); форуми умумиҷаҳонии «Физико-химические методы в междисциплинарных экологических исследованиях» (Москва, 2023); «Вазъи кунунӣ ва дурнамои таҳлили физико-химиявӣ» (Душанбе, 2023); XIX ҳонишҳои Нуъмоновӣ «Развитие фундаментальной и прикладной химии и её вклад в индустриализацию страны» (Душанбе, 2024) конференсияи байналхалқӣ «Химическая наука и образование, проблемы и перспективы развития» (Махачкала, 2024); «XXII Менделеевский съезд по общей и прикладной химии» (Сириус, 2024); «Вопросы физической и координационной химии» (Душанбе, 2024); «Вазъи кунунӣ ва дурнамои таҳлили физико-химиявӣ» (Душанбе, 2025); «IX Булатовские чтения» (Красноярск, 2025); «V форуми маводшиносии Байкал» (Улан-Удэ, 2025); муҳокимаи шуда, аз апробатсия гузаштаанд.

Интишорот аз рӯи мавзӯи диссертатсияи доктор (PhD). Вобаста ба натиҷаҳои ноилшудаи кори диссертатсионӣ 26 қорҳои илмӣ, аз онҳо 2 – нахустпатенти ихтироот, 10 – мақола дар журналҳои аз ҷониби КОА назди Президенти Ҷумҳурии Тоҷикистон ва КОА ФР (1-то Scopus) тавсияшуда нашр шудаанд. Бояммонда 14 – то мавод дар шакли фишурдаи маърузаҳо дар симпозиум, форум ва конференсияҳои сатҳҳои гуногуни байналхалқӣ ва ҷумҳуриявӣ ба нашр расидаанд.

Ҳаҷм ва сохтори кори диссертатсионии доктор (PhD). Диссертатсия дастанвисест, ки дар 147 саҳифаи ҷопи компютерӣ оварда шуда, аз муқаддима, 3 боб ва хулосаҳо ташкил ёфтааст, инчунин дорои 42 расм ва 36 ҷадвал, 131 номгуӣ адабиёти иқтибосшуда мебошад.

МУНДАРИҶАИ АСОСИИ ҚОР

Дар муқаддима мабрамият ва зарурати таҳқиқ бо аҳамияти мавзӯи кори диссертатсионӣ дарҷ гардида, ҳадаф ва вазифаҳои он муайян карда шуда, аҳамияти илмӣ назариявӣ ва амалӣ инъикоси худро ёфтааст.

Дар боби якум рисола мухтасаран шарҳи сарчашмаҳои илмӣ оид ба усулҳои таҳқиқи системаҳои химиявӣ, хусусан системаҳои бисёркомпонента оварда шудааст.

Дар боби дуюм натиҷаҳои омӯзиши изотермаи фазоҳосилшавӣ ва изотермаи ҳалшавандагии системаи дараҷаи дуюм пешниҳод ва тафсир карда шудаанд. Чунин система дар ҳарорати 273 К аз катионҳои Na^+ , Ca^{2+} , Al^{3+} , анионҳои SO_4^{2-} , HCO_3^- ва зерсистемаҳои он иборат аст. Онҳо бо диаграммаҳои чун: комплекси фазавӣ ва ҳалшавандагӣ тасвир карда мешаванд.

Боби сеюм рисолаи диссертатсионӣ ба маълумот оид ба ҳалшавандагӣ ва ҳосилшавии фаза дар системаи дараҷаи дуюм бахшида шудааст. Система аз катионҳои Na^+ , Ca^{2+} , Al^{3+} анионҳои SO_4^{2-} , HCO_3^- ва зерсистемаҳои се ва чоркомпонентаи таркиби он дар ҳарорати 298 К иборат аст. Дар асоси ин натиҷаҳо, диаграммаҳои ҳосилшавии фаза ва ҳолати муштарак сохта шудаанд.

Кори диссертатсионии мазкур бо хулосаҳои асосӣ, тавсияҳои пешниҳодшуда оид ба татбиқи амалии маълумоти аз ҷониби муаллиф ба даст овардашуда, ҳамчунин замима ва рӯйхати адабиёти истифодашуда ба анҷом мерасад.

Дар кор ихтисорот ва ишораҳои зерин қабул шудаанд: Gr – гипс ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$); Mib – мирабилит ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$); Nh – нахколит (NaHCO_3); Al-18 – октадекагидрати сульфати алюминий ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$); AlH – гидрокарбонати алюминий ($\text{Al}(\text{HCO}_3)_3$); CaH – гидрокарбонати калсий ($\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$); Na·Al-12 – додекагидрати сульфатҳои натрий-алюминий $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot \text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$; Gb – глауберит $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot \text{CaSO}_4$; СБ – системаҳои бисёркомпонента; СПМ – системаҳои панҷкомпонентаи муовиза; СЧМ – системаҳои чоркомпонентаи муовиза; СС – системаҳои секомпонента; АТФХ – асосҳои таҳлили физико-химиявӣ; БЯФ – блоки ягонаи фазаӣ; КИО – компонентҳои ибтидоии омехтаҳо.

Системаҳои бисёркомпонента ва усулҳои таҳқиқи онҳо

Барои бунёд ва тақмили усулҳои саноатии коркарди маводҳои табиӣ ва сунъӣ, асоси муҳими назариявӣ ин дарки амиқи қонуниятҳои ташаккули фазаҳо дар системаҳои химиявӣ мебошад. Таҳқиқоти физикӣ-химиявӣ усули асосии омӯзиши системаҳои зикршуда ба ҳисоб меравад. Ин таҳқиқот имкон медиҳад, ки хусусиятҳои таъсири мутақобила ва ҳамкориҳои ҷузъҳои таркибии система дар ҳолатҳои гуногуни агрегати муайян карда шаванд. Дар натиҷаи таҳқиқотҳо, диаграммаҳои ҳалшавандагӣ, гудозиш ва диаграммаҳои фазаӣ сохта мешаванд, ки дар бораи шароити мувозинати фазаӣ маълумот медиҳанд.

Бо зиёд шудани шумораи моддаҳо, миқдори зерсистемаҳои эҳтимоли қариб, ки ба таври экспоненсиалӣ меафзояд. Ин боиси афзоиши назарраси ҳаҷми маълумоти таҷрибавӣ (аз ҷумла ҳалшавандагӣ ва ҳарорати гудозиш) мегардад, ки барои таҳлили пурраи сохторӣ бо усулҳои анъанавӣ бояд ба даст оварда шавад. Ҳисобҳои овардашуда нишон медиҳанд, ки барои системаи шашкомпонентӣ таҳқиқоти таҷрибавӣ бинобар шумораи бениҳоят зиёди нуқтаҳои таҷрибавии зарурӣ амалан ғайриимкон мегардад.

Системаҳои химиявӣ, бахусус обӣ-намакӣ, бо усулҳои гуногун таҳқиқ карда мешаванд, ки дар байни онҳо усулҳои визуалию политермӣ, Схрейнемакерс, усули буришҳо ва графоаналитикӣ фарқ мекунад. Дар рисолаи докторӣ системаи панҷкомпонентаи Na^+ , Ca^{2+} , $\text{Al}^{3+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, $\text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$ бо истифода аз усули тарҷумаи Л. Солиев, ки таҳия шудааст, таҳлил карда шуд. Ин усул бо муваффақият дар таҳқиқи мувозинатҳои химиявии бисёркомпонентаи мураккаб истифода шудааст. Масалан, барои омӯзиши системаи шашкомпонентаи дараҷаи дуюм: Na , K , Mg , $\text{Ca} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, Cl^- , $-\text{H}_2\text{O}$. Система зерсистемаҳои панҷкомпонентаи қаблан таҳқиқшударо дар бар мегирифт. Барои як қатор системаҳои дигари панҷкомпонентаи дараҷаи дуюм, масалан, K , Ca , $\text{Mg} \parallel \text{SO}_4$, $\text{Cl}^- - \text{H}_2\text{O}$, усули тарҷума низ самаранок буд.

Ҷадвали 1 маълумотро дар бораи дараҷаи омӯзиши системаи панҷкомпонента, ки аз ионҳои Na^+ , Ca^{2+} , Al^{3+} , SO_4^{2-} , HCO_3^- ва об иборат аст, ва зерсистемаҳои он дар ҳарорати 273 ва 298 К дар бар мегирад. Дар рафти таҳқиқи ин система муқаррар карда шуд, ки панҷ зерсистемаи чоркомпонента (дуто бо иони умумӣ ва сето ивазшаванда), инчунин нӯҳ зерсистемаи секомпонента мавҷуданд, ки баъзе аз онҳо қисми чоркомпонента мебошанд.

Ҷадвали 1 – Ҳолати омӯзиши системаи панҷкомпонентаи Na^+ , Ca^{2+} , $\text{Al}^{3+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, $\text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$ бо зерсистемаҳои чор- ва секомпонента дар ҳароратҳои 273 ва 298 К.

№ р/т	Система	Компонентнокӣ	Изотерма, К	
			273	298
1.	Na^+ , Ca^{2+} , $\text{Al}^{3+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, $\text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$	5	-	-
2.	Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, $\text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$	4	-	-
3.	Na^+ , $\text{Al}^{3+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, $\text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$	4	-	-
4.	Ca^{2+} , $\text{Al}^{3+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, $\text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$	4	-	-

5.	$\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+}, \text{Al}^{3+} \parallel \text{SO}_4^{2-}-\text{H}_2\text{O}$	4	-	-
6.	$\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+}, \text{Al}^{3+} \parallel \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$	4	-	-
7.	$\text{Na}^+ \parallel \text{SO}_4^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$	3	+	+
8.	$\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+} \parallel \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$	3	+	+
9.	$\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$	3	+	+
10.	$\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}-\text{H}_2\text{O}$	3	+	+
11.	$\text{Na}^+, \text{Al}^{3+} \parallel \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$	3	-	-
12.	$\text{Al}^{3+} \parallel \text{SO}_4^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$	3	-	-
13.	$\text{Na}^+, \text{Al}^{3+} \parallel \text{SO}_4^{2-}-\text{H}_2\text{O}$	3	-	-
14.	$\text{Ca}^{2+}, \text{Al}^{3+} \parallel \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$	3	-	-
15.	$\text{Ca}^{2+}, \text{Al}^{3+} \parallel \text{SO}_4^{2-}-\text{H}_2\text{O}$	3	-	-

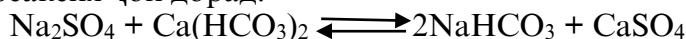
Тавре ки аз ҷадвали 1 бармеояд, системаи панҷкомпонентаи $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+}, \text{Al}^{3+} \parallel \text{SO}_4^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$ ва системаҳои чоркомпонентаи: $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$; $\text{Na}^+, \text{Al}^{3+} \parallel \text{SO}_4^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$; $\text{Ca}^{2+}, \text{Al}^{3+} \parallel \text{SO}_4^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$; $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+}, \text{Al}^{3+} \parallel \text{SO}_4^{2-}-\text{H}_2\text{O}$ ва $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+}, \text{Al}^{3+} \parallel \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$ умуман омӯхта нашуда, диаграммаи фазаӣ ва ҳолатиашон сохта нашудааст.

Аз 9 системаҳои секомпонентаи таркибӣ, чунин системаҳо: $\text{Na}^+ \parallel \text{SO}_4^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$; $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+} \parallel \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$; $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$ ва $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}-\text{H}_2\text{O}$ танҳо дар ҳароратҳои 273 ва 298 К хуб омӯхта шудаанд. Боқимонда 5 системаи секомпонентаи дигар: $\text{Na}^+, \text{Al}^{3+} \parallel \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$; $\text{Al}^{3+} \parallel \text{SO}_4^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$; $\text{Na}^+, \text{Al}^{3+} \parallel \text{SO}_4^{2-}-\text{H}_2\text{O}$; $\text{Ca}^{2+}, \text{Al}^{3+} \parallel \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$ ва $\text{Ca}^{2+}, \text{Al}^{3+} \parallel \text{SO}_4^{2-}-\text{H}_2\text{O}$ умуман таҳқиқ нашуда, мавриди омӯзиши мо қарор доранд.

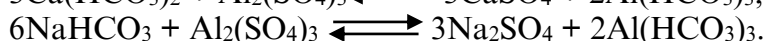
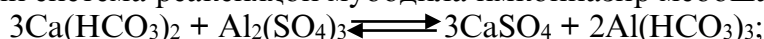
Фазаҳосилшавӣ дар шаклҳои геометрии системаи обӣ-намакии панҷкомпонентаи $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+}, \text{Al}^{3+} \parallel \text{SO}_4^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$ дар 273 К

Системаи таҳқиқшаванда аз об ва ду моддаҳои реаксияҳои муовизаро ташкилдиҳанда, илова бар ин, аз як моддаи дигар, ки бо яке аз он ду реаксияҳои муовиза иони умумӣ дорад, иборат мебошанд. Чунин системаҳоро бо формулаҳои зерин ифода кардан мумкин аст: $\text{A}^+, \text{B}^+, \text{C}^{+//} \text{X}^-, \text{Y}^- - \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{A}^+, \text{B}^+ // \text{X}^-, \text{Y}^-, \text{Z}^- - \text{H}_2\text{O}$. Ин формулаҳо нишон медиҳанд, ки дар система катионҳои А, В, С ва анионҳои Х ва Y мавҷуданд.

Объекти таҳқиқоти кори илмӣ мо системаи панҷкомпонентаи муовизаи $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+}, \text{Al}^{3+} \parallel \text{SO}_4^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$ буда, он мисоли катионҳои А, В ва С ин $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+}$ ва Al^{3+} ва анионҳои Х ва Y инҳои SO_4^{2-} ва HCO_3^- мебошанд. Система аз ҷуфти намакҳои муовизаи зерини Na_2SO_4 , $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ ва NaHCO_3 , CaSO_4 иборат буда, байни онҳо чунин реаксия ҷой дорад:



Дар система боз об ва як намаки дигари $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ мавҷуданд. Бо ҳамин сабаб барои ин система реаксияҳои мубодила имконпазир мебошад.

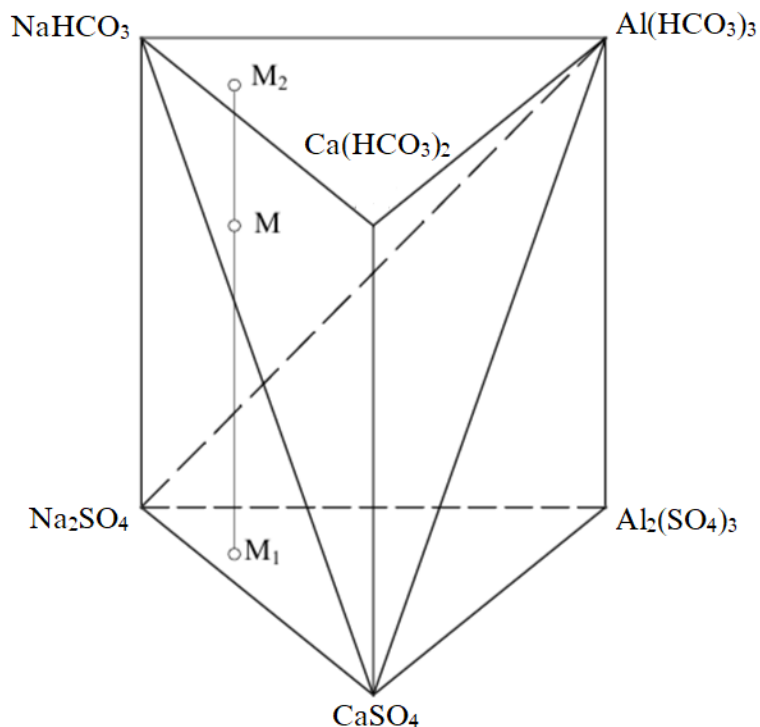


Қайд кардан муҳим аст, ки муодилаҳои реаксияҳо пурра мустақил нестанд, балки бо ҳам алоқаманданд. Масалан, реаксияи муовизаи NaHCO_3 бо $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ -ро бо роҳи тағир додани муодилаи реаксияи Na_2SO_4 бо $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ (гузаронидани тарафи чап ба рост ва баръакс) ва сипас ҷамъ кардани он бо муодилаи муовизаи $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ бо $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ҳосил кардан мумкин аст.

Дар натиҷа, системае, ки дорои ҳафт қисми таркибӣ аст (Na_2SO_4 , $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$, NaHCO_3 , CaSO_4 , $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, $\text{Al}(\text{HCO}_3)_3$ ва H_2O (расми 1), бо ду реаксияи химиявӣ мустақил тавсиф мешавад, ки ин нишон медиҳад, ки панҷ компоненти мустақил мавҷуд аст.

Ҳамин тариқ, ин система системаи панҷкомпонентаи муовиза бо ҳалқунандаи обӣ мебошад. Истисно кардани об боиси мубаддалшавии система ба чоркомпонента мегардад, ки он ҳамчун системаи муовизаи гудохтаи чоркомпонента маълум аст.

Призмаи секунҷа ҳамчун тасвири визуалии ин система хизмат мекунад. Асоси призма секунҷаи баробарпаҳлӯ буда, сатҳи паҳлӯии он аз чоркунҷаҳо иборат аст (рас. 1).



Расми 1 – Сохтори ҷойгиршавии нуқтаҳо дар системаи обӣ, ки ионҳои натрий, калсий, алюминий, сулфат, гидрокарбонатро дар бар мегирад.

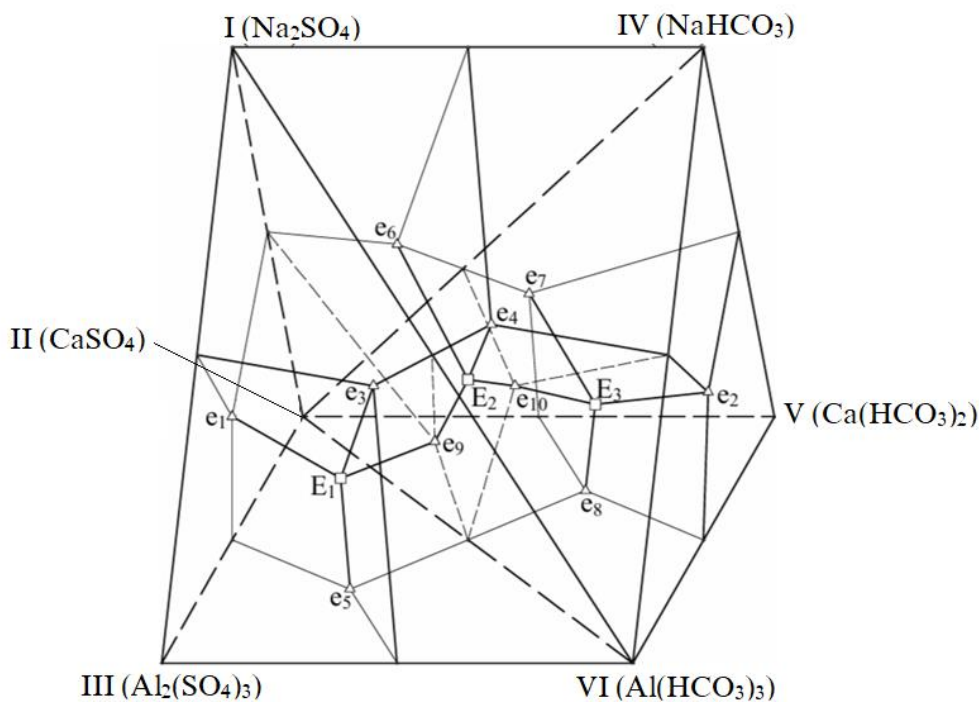
Призмаеро дида мебароем, ки ҳамаи теғаҳои он дарозии якхела доранд, ки онро 100 воҳиди шартӣ қабул мекунем. Миқдори катионҳое, ки дар асосҳои ин призма ҷойгир шудаанд, ба принципҳои сохтани диаграммаҳои системаҳои секомпонентагӣ бо усули Розебом мувофиқат мекунад. Дар натиҷа, ду нуқта муайян карда мешаванд, ки бо M_1 ва M_2 ишора карда мешаванд. Пайвастшавии ду нуқта тавассути порчаи рӯсте амалӣ карда мешавад. Ин порчаи M_1M_2 , ки ба яке аз теғаҳои паҳлӯии призма параллел аст ва дарозии 100 воҳиди шартӣ дорад, бо нуқтаи M ба ду қисм тақсим мешавад: M_1M , ки андозаи он ба u баробар аст, ва M_2M , ки андозаи он x -ро ташкил медиҳад.

Қуллаҳои призма намакҳои индивидуалии таркиби системаи мавриди баррасӣ қарор гирифта дохил мешаванд. Агар намакҳои дучанда ва кристаллогидратҳо мавҷуд набоянд ва фазаҳои саҳт аз шаш намак иборат бошанд (Na_2SO_4 , $Ca(HCO_3)_2$, $NaHCO_3$, $CaSO_4$, $Al_2(SO_4)_3$, $Al(HCO_3)_3$), пас тамоми призма ба шаш минтақаи кристаллизатсия тақсим мешавад. Ҳар як минтақа барои таҳшин шудани яке аз ин намакҳо масъул аст (рас. 2). Сарҳадҳои байни ин минтақаҳо шароитҳоеро нишон медиҳанд, ки дар онҳо ду намак дар як вақт кристаллизатсия мешаванд. Хати бурриши ин сатҳҳо, ки хатҳои маҳдудкунанда номида мешаванд, таркиби маҳдудҳоеро ифода мекунанд, ки дар онҳо се намак якҷоя таҳшин мешаванд.

Дар охир, нуқтаҳои E_1 , E_2 ва E_3 ба маҳдудли намакҳое мувофиқат мекунанд, ки дар онҳо якбора чор намак кристаллизатсия мешаванд: дар E_1 – намакҳои Na_2SO_4 , $CaSO_4$, $Al_2(SO_4)_3$, $Al(HCO_3)_3$; дар E_2 – $CaSO_4$, $NaHCO_3$, $Al(HCO_3)_3$, Na_2SO_4 ва дар E_3 – чор намак $CaSO_4$, $NaHCO_3$, $Ca(HCO_3)_2$, $Al(HCO_3)_3$. Ин нуқтаҳо эвтоникаи

чоркомпонента барои системаҳои бе ҳалкунанда ва проексияҳои намакии эвтоникаи чоркомпонента барои системаҳои дорой ҳалкунанда мебошанд.

Диаграммаи ибтидоии призматикӣ бо ёрии буришҳои ҳамвор ба се тетраэдри номунтазам тақсим карда шуд. Аз ҷумла, буриши диагональ, ки аз қуллаҳои Na_2SO_4 – CaSO_4 – $\text{Al}(\text{HCO}_3)_3$ ҳосил шудааст, тетраэдрро ҷудо кард, ки $\text{Al}(\text{HCO}_3)_3$ – Na_2SO_4 – CaSO_4 -ро дар бар мегирад. Буриши диагоналии минбаъда, ки аз қуллаҳои NaHCO_3 – CaSO_4 – $\text{Al}(\text{HCO}_3)_3$ дар қисми боқимондаи призма гузаронида шуд, ду тетраэдри номунтазामी иловагиро ташкил дод: Na_2SO_4 – NaHCO_3 – $\text{Al}(\text{HCO}_3)_3$ – CaSO_4 и $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ – NaHCO_3 – CaSO_4 – $\text{Al}(\text{HCO}_3)_3$.



Расми 2 – Схемаи фазаҳосилшавии системаи панҷкомпонентаи Na^+ , Ca^{2+} , $\text{Al}^{3+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, HCO_3^- – H_2O дар изотермаи 273 К

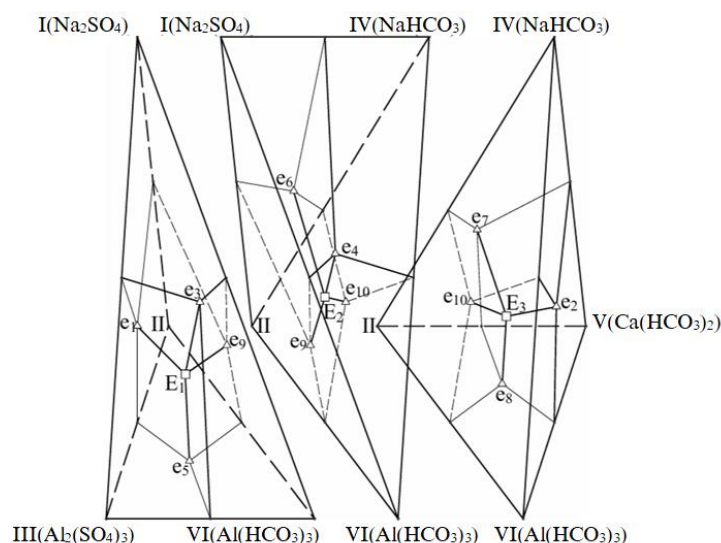
Ба ин васила, таркиби система ё массаи намакӣ ҳамеша бо ёрии чор намак ифода шуда метавонад. Аз кадом чор намакҳо ифодаёбии онҳо аз он вобаста аст, ки нуқтаи фигуративии додашуда дар кадоме аз се тетраэдрҳои зикршуда қарор дорад. Дар расми 3 чунин тақсими диаграммаи призматикӣ, ки дар расми 2 тасвир шудааст, бо ёрии ду буришҳои диагоналии: I, II, VI ва II, IV, VI нишон дода шудааст.

Барои тасвири диаграммаи бадастаомада дар ҳамворӣ мо метавонем аз проексияҳои ортогоналии асосдор ва яке аз сатҳҳои паҳлӯии призма истифода барем.

Баъзан барои дидани қисмҳои диаграммаи призмавӣ аз усули проексияи перспективӣ истифода мебаранд. Маркази ин усул дар як ғӯшаи призма ҷойгир аст. Биёед сатҳҳои канории (сарҳадии) минтақаи кристаллшавии $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ -ро мисол гирем (расми 3, тарафи рост). Ин сатҳҳо аз ғӯшаи V ба ҳамворие, ки аз нуқтаҳои II, IV ва VI мегузарад, проексия карда мешаванд. Дар натиҷа, як диаграммаи ҳамвор ба вуҷуд меояд. Ин диаграмма дар секунҷаи баробарпахлӯи VI-II-IV ҷойгир аст.

Ифодаи дученакаи ин диаграммаро ба даст овардан мумкин аст. Барои ин, истифода бурдани проексияҳои ортогоналии асос ва яке аз рӯяҳои паҳлӯии призма зарур аст. Баъзан, барои тасвири элементҳои диаграммаи призматикӣ, проексияи перспективӣ истифода мешавад. Дар ин ҳолат, маркази проексия бо яке аз қуллаҳои призма мувофиқ меояд. Масалан, сатҳҳое, ки сарҳади кристаллизатсияи $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ -

ро маҳдуд мекунанд (расми 3, тарафи рост), метавонанд аз қуллаи V ба ҳамворие, ки бо нуқтаҳои II, IV ва VI муайян карда мешавад, проексия карда шаванд. Натиҷа - диаграммаи ҳамворест, ки дар дохили секунҷаи баробарпахлӯи VI-II-IV ҷойгир аст.



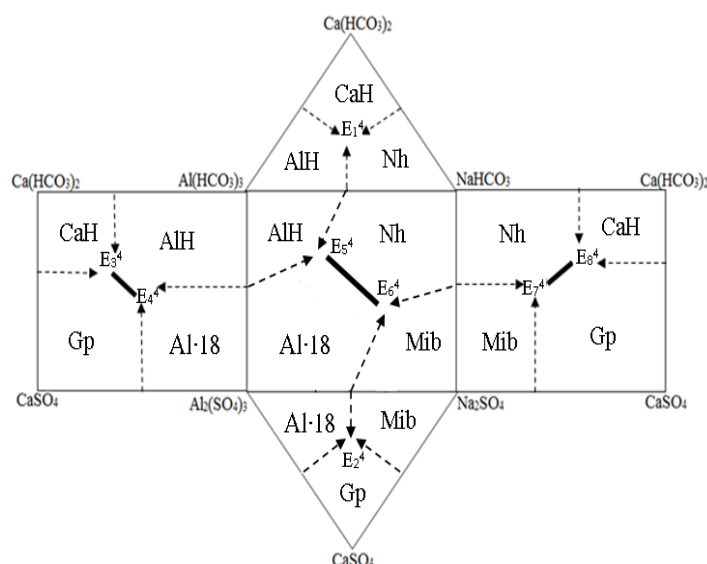
Расми 3 – Триангулятсияи проексияи намакии изотермаи фазаҳосилшавии системаи $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+}, \text{Al}^{3+} \parallel \text{SO}_4^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$ бо ду буриши диагоналии устувор

Мувофиқи маълумотҳои бо ёрии усули транслятсия ба даст овардаамон бошад, ба системаи $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+}, \text{Al}^{3+} \parallel \text{SO}_4^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$ дар сатҳи чоркомпонентагӣ нуқтаҳои нонвариантии зерин бо фазаҳои саҳти дар мувозинатбудаашон хос мебошанд (ҷад. 2).

Ҷадвали 2 – Нуқтаҳои нонвариантии сатҳи чоркомпонентагии системаи $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+}, \text{Al}^{3+} \parallel \text{SO}_4^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$ дар ҳарорати 273 K

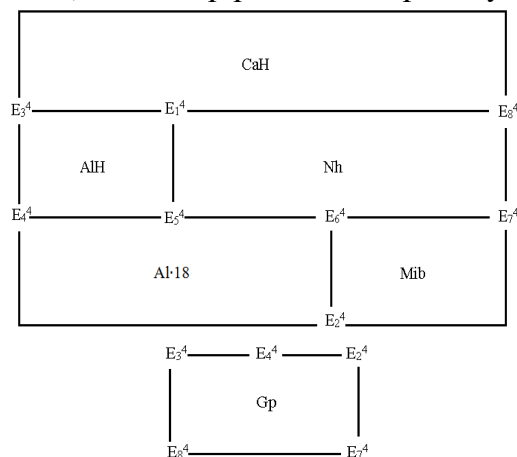
Нуқтаҳои нонварианти	Система	Фазаҳои саҳти дар мувозинат буда
E_1^4	$\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+}, \text{Al}^{3+} \parallel \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$	Nh + CaH + AlH
E_2^4	$\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+}, \text{Al}^{3+} \parallel \text{SO}_4^{2-} - \text{H}_2\text{O}$	Mib + Gp + Al·18
E_3^4 E_4^4	$\text{Ca}^{2+}, \text{Al}^{3+} \parallel \text{SO}_4^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$	Gp + CaH + AlH Gp + AlH + Al·18
E_5^4 E_6^4	$\text{Na}^+, \text{Al}^{3+} \parallel \text{SO}_4^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$	Nh + AlH + Al·18 Mib + Nh + Al·18
E_7^4 E_8^4	$\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$	Mib + Nh + Gp Nh + CaH + Gp

Ифодаи диаграммаҳои ҳолат яке аз вазифаҳои асосӣ дар таҳлили системаҳои бисёркомпонентагӣ мебошад. Сарфи назар аз истифодаи васеи диаграммаҳои призматикӣ, ин усул танҳо имкони нишон додани таркиби намакии системаҳои панҷкомпонентиро медиҳад (расми 2). Якҷоякунии якчанд чунин диаграммаҳо боиси мураккаб шудани тафсири онҳо мегардад. Ақидаи «Призмаи кушода», ки аз ҷониби Л. Солиев барои беҳтар намудани муаррифии мувозинати фазагӣ дар системаҳои бисёркомпонентагии мубодила пешниҳод шудааст, аз ҷониби мо дар омӯзиши системаи панҷкомпонентии $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+}, \text{Al}^{3+} \parallel \text{SO}_4^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$ истифода шудааст (расми 4).



Расми 4 – «Призмаи кушода» - воситаи ифодакунии таҳлили табдилёбиҳои фазагӣ ва муайянкунии минтақаҳои кристаллизатсияи фазаҳои гуногуни минералӣ дар системаи обӣ - намакии тартиби дуум дар ҳарорати 273 К дар сатҳи 4-чоркомпонентагӣ

Бо мақсади минбаъд соддатар кардани диаграммаи овардашуда, масалан якҷоякунии кристаллизатсияи фазаҳои саҳти алоҳида, онро ба намуди схематикӣ пешниҳод кардан мумкин аст, ки он дар расми 5 оварда шудааст.



Расми 5 – Диаграммаи схематикӣ сатҳи чоркомпонентагӣ табдилоти фазагӣ дар системаи тартиби дуум (ионҳои натрий, калсий, алюминий, гидрокарбонат, сульфат ва об) дар 273 К.

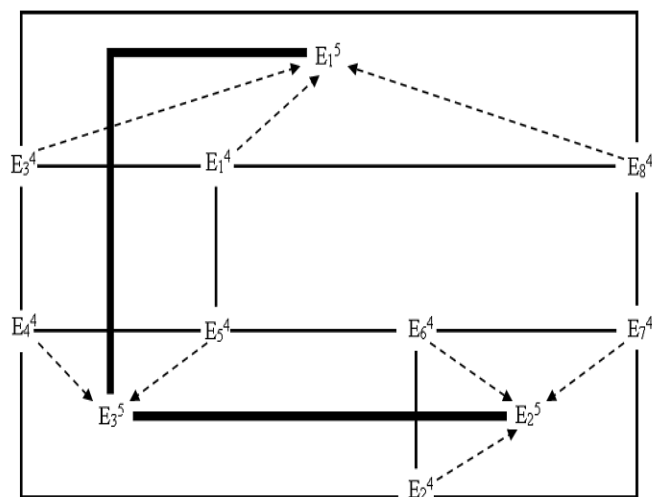
Ҳангоми истифодаи усули транслятсия, вақте ки компоненти панҷум ба ягон системаи чоркомпонентагӣ илова карда мешавад, элементҳои геометрии охирин андозаи худро ба як воҳид зиёд мекунам ва дар сатҳи компонентнокии навбатӣ табдил ва транслятсия мешаванд, ки дар сатҳи панҷкомпонентагӣ нуқтаҳои нонвариантии зеринро ташкил медиҳанд:

$$E_1^4 + E_8^4 + E_3^4 \longrightarrow E_1^5 = \text{AlH} + \text{CaH} + \text{Nh} + \text{Gp};$$

$$E_2^4 + E_6^4 + E_7^4 \longrightarrow E_2^5 = \text{Al-18} + \text{Gp} + \text{Mib} + \text{Nh};$$

$$E_4^4 + E_5^4 \longrightarrow E_3^5 = \text{Gp} + \text{Al-18} + \text{AlH} + \text{Nh}.$$

Дар расми 6 диаграммаи фазаҳосилшавии системаи Na^+ , Ca^{2+} , $\text{Al}^{3+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, HCO_3^- - H_2O дар ҳарорати 273 К дар сатҳи чор-панҷкомпонентагӣ, бо дарназардошти ҳамаи нуқтаҳои нонвариантии муайяншуда оварда шудааст.



Расми 6 – Системаи Na^+ , Ca^{2+} , $\text{Al}^{3+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, HCO_3^- - H_2O дар 273 К. Диаграммаи шароитҳои ҳосилшавии фазаҳо, дар сатҳи чор-панҷкомпонентагӣ

Соҳти диаграмма (рас. 6) таҳқиқ карда шуд. Муайян гардид, ки ин диаграмма панҷкомпонента буда, дорои 3 нуқтаи нонварианти ва 10 хатти моноварианти аст. Нуқтаҳои нонварианти дорои таркиби мушаххаси фазаҳои саҳти мувозинатӣ мебошанд.

Ҳафт хати моноварианти тавассути транслятсияи нуқтаҳои нонвариантии сатҳи чоркомпонентагӣ ҳосил шуда, бо хатҳои пунктирӣ бо нишондиҳандаҳои векториҳои самти транслятсия ифода карда шудаанд.

Фрагментатсияи диаграммаи фазаҳосилшавии бо усули транслятсия сохташуда имконият медиҳад, ки роҳҳои кристаллизатсияи намакҳо дар системаҳои мураккаби бисёркомпонента дар асоси таркиби фазаҳои саҳти дар интиҳо ва дар ибтидо ҷудошуда, таҳлил ва пешгӯӣ карда шаванд.

Ҳалшавандагӣ дар нуқтаҳои нонвариантии системаи Na^+ , Ca^{2+} , $\text{Al}^{3+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$ - H_2O дар ҳарорати 273 К.

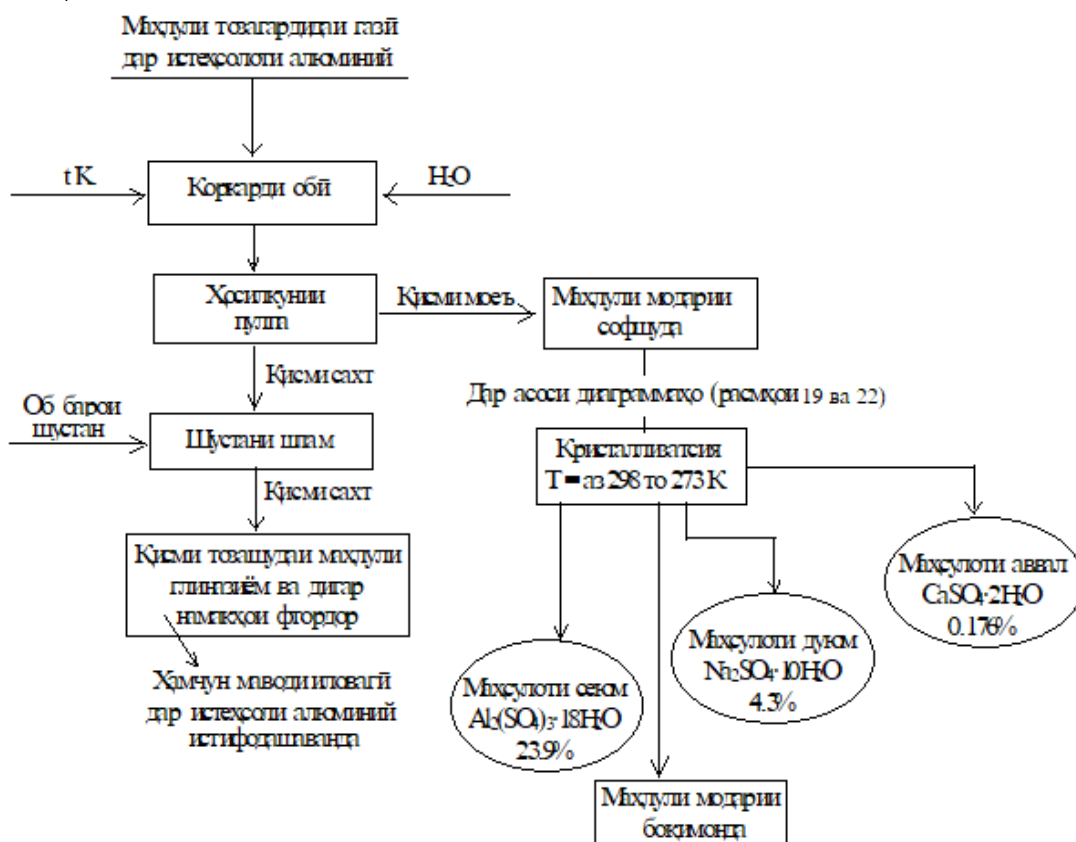
Ҳолати нуқтаи нонварианти, ки бо усули транслятсия ба даст оварда шудааст, бо мақсади муайян кардани ҳалшавандагӣ ба таври таҷрибавӣ омӯхта шуд. Тадқиқоти таҷрибавӣ бо мақсади муайян кардани хусусиятҳои нуқтаи нонварианти, ки бо истифода аз усули транслятсия ба даст оварда шудааст, гузаронида шуд. Он бо истифода аз як қатор равишҳои методологӣ амалӣ карда шуд, ки яке аз усулҳои истифодашуда усули титркунӣ буд.

Ба мақсади тасдиқи таҷрибавии маълумот оид ба ташаккули фазаҳо дар нуқтаҳои нонвариантии системаи таҳқиқшаванда, ки бо усули транслятсия ба даст оварда шудаанд, таҳқиқи ҳалшавандагӣ дар як қатор системаҳои чоркомпонента гузаронида шуд. Дар байни системаҳои омӯхташуда системаи ионҳои умумии Na^+ , Ca^{2+} , $\text{Al}^{3+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$ - H_2O (дар ҳарорати 273 К) ва системаи мубодилавии Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, HCO_3^- - H_2O (дар ҳароратҳои 273 ва 298 К) буданд.

Баъдан бо истифода аз проексияҳои ортогоналӣ ва перспективӣ, ки аз корҳои қаблӣ мутахассисон бо пуррагӣ фарқ дорад, диаграммаи комплекси фазагӣ дар асоси тетраэдри намакии таркиб сохта шуда, нишон дода шудааст. Дар проексияи ортогоналии комплекси фазагӣ ишораҳои зеринро мушоҳида намудан мумкин аст: e_1 , e_2 , e_3 – проексияҳои нуқтаҳои нонварианти бо таркибҳои маҳлулҳои моносершудаи компонентҳои Na_2SO_4 , CaSO_4 , $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$; E_1^3 – E_1^4 , E_2^3 – E_1^4 , E_3^3 – E_1^4 - проексияи хатҳои моновариантии нисбат ба ду фазаи мувофиқи $\text{Mb} + \text{Gr}$, $\text{Gr} + \text{Al} \cdot 18$ ва $\text{Mb} + \text{Al} \cdot 18$; e_1 – E_1^3 – E_1^4 – E_3^3 – e_1 – майдони дивариантии кристаллизатсияи фазаи Mb ; e_2 – E_1^3 – E_1^4 – E_2^3 – e_2 –

майдони дивариантии кристаллизатсияи фазаи Gr; e_3 - E_3^3 - E_1^4 - E_2^3 - e_3 – майдони дивариантии кристаллизатсияи фазаи Al·18; E_1^4 – нуқтаи нонвариантии таркиби маҳлули мувозинатие, мебошад, ки дар он фазаҳои Mb, Gr ва Al·18 якҷоя дар мувозинат мебошанд.

Тавре ки қайд карда шуд, аз партовҳои моеъи саноатии истеҳсоли алюминий схемаи принципиалии технологияи кристаллизатсияи моддаҳои химиявӣ таҳия карда шудааст. Барои ин, диаграммаҳои мураккаби мувозинати фазагии системаи Ca^{2+} , Na^+ , $Al^{3+} \parallel SO_4^{2-} - H_2O$, ки бо ёрии методи универсалии транслятсия сохта шудаанд, истифода шуданд, ки барои хатҳо, майдонҳо ва нуқтаҳо таҳия шудааст (расми 7). Мувофиқи он нишон дода шудааст, ки дар минтақаҳои дивариантӣ як фаза, дар хатҳои моновариантӣ - ду ва дар нуқтаҳои нонвариантӣ - се фаза дар мувозинат қарор доранд. Ҳангоми коркард дар шаклҳои зикршуда, моддаҳо зина ба зина, мувофиқи ҳалшавандагӣ ва миқдори мавҷудият дар таркиби партовҳои моеъи саноатӣ ҳосил мешаванд.

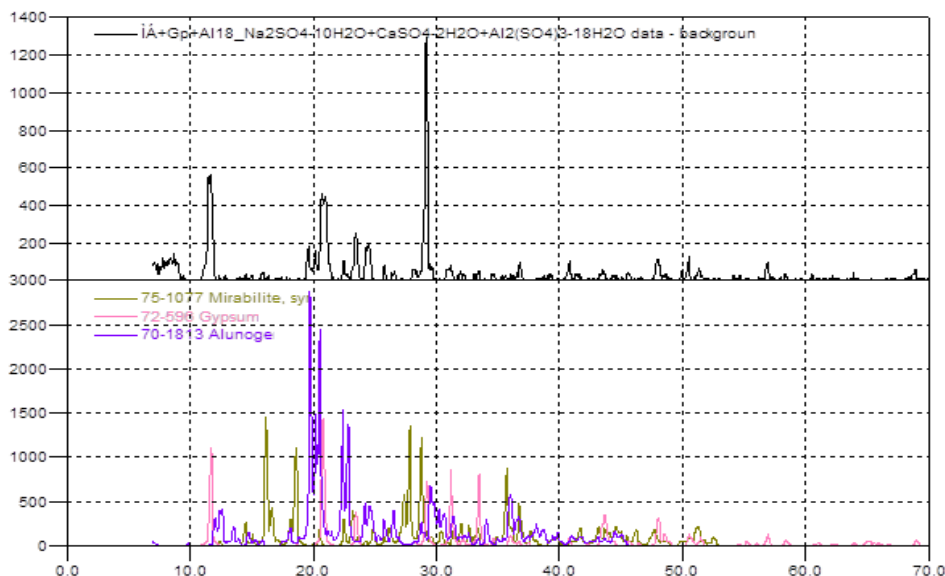


Расми 7 – Схемаи принципиалии технологияи раванди кристаллизатсияи фазаҳои саҳти алоҳида дар системаи Na^+ , Ca^{2+} , $Al^{3+} \parallel SO_4^{2-} - H_2O$

Одатан, дар сатҳи маҳлулҳои сершуда, кристаллизатсия чунин тартиб мегирад. Ростшавии кристаллҳо дар ҳамворироҳе сурат мегирад, ки таркиби маҳлул ва яке аз се тарафи тетраэдр муайян мекунад. Ин се тараф иборатанд аз маҳлули обии сулфати калсий, маҳлули обии сулфати натрий ва маҳлули обии сулфати алюминий. Дар диаграммаи ҳолати фазаӣ, ин роҳҳои кристаллизатсия ба монанди хатҳои яктағйирёбанда (моновариантӣ) дида мешаванд. Диаграммаи пешниҳодшуда нишон медиҳад, ки дар вақти бухоршавии изотермӣ, таркиби намакии маҳлулҳои сершуда чӣ гуна тағйир меёбад. Ин як хусусияти муҳими проексияи марказӣ аст.

Ҳалшавандагии ками сулфати калсий дар муқоиса бо дигар компонентҳои системаи Na^+ , Ca^{2+} , $Al^{3+} \parallel SO_4^{2-} - H_2O$, аввал ба майдони кристаллизатсияи $CaSO_4$ ($CaSO_4 E_1^3 E_1^4 E_2^3 CaSO_4$) оварда мерасонад. Яъне, аввал майдони кристаллизатсияи

CaSO_4 ба вучуд омада, гипси холис ҷудо мешавад. Дар ин ҳолат, нуқтаи ҳалшуда дар хати рости CaSO_4 М аз M_1 ҳаракат мекунад, таркиби фаза дар нуқтаи сулфати натрий қарор мегирад. Фазаҳои сахти майдонҳо, хатҳо ва нуқтаҳо ба даст оварда шуданд. Таҳлили рентгенофазавии онҳо гузаронида шуд. Дифрактограммаи фазаҳои мувозинатӣ барои нуқтаи нонварианти дар расми 8 нишон дода шудааст.



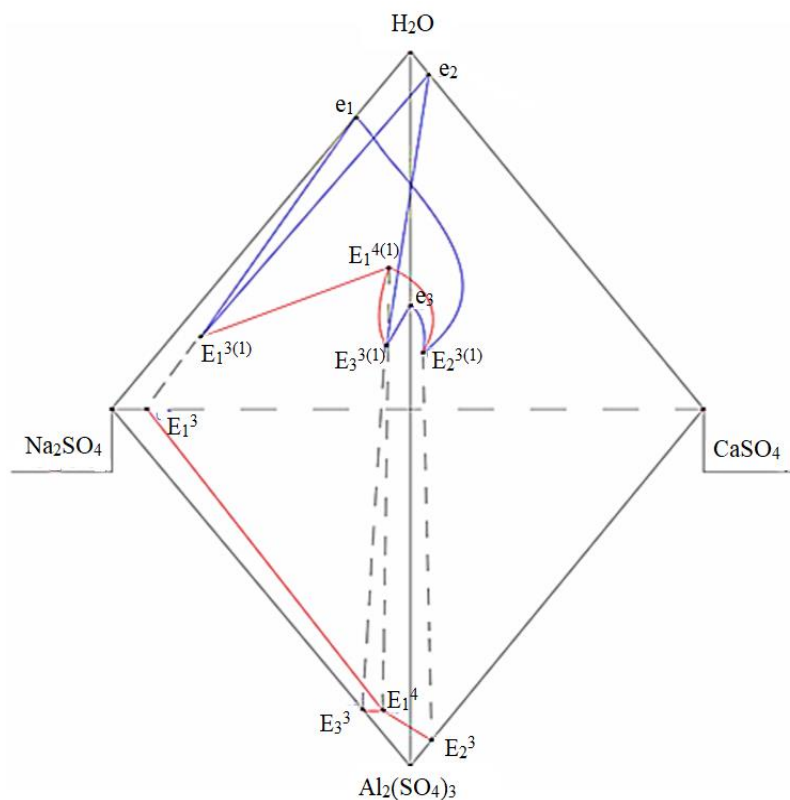
Расми 8 – Дифрактограммаи фазаҳои сахти мувозинатии нуқтаи нонвариантии системаи Na^+ , Ca^{2+} , $\text{Al}^{3+} \parallel \text{SO}_4^{2-} - \text{H}_2\text{O}$ дар 273 К

Маҳлули моеъи системаи таҳқиқотӣ таҳлили химиявӣ карда шуда, натиҷаи он дар ҷадвали 3 оварда шудаанд.

Ҷадвали 3 – Ҳалшавандагии системаи чоркомпонентаи Na^+ , Ca^{2+} , $\text{Al}^{3+} \parallel \text{SO}_4^{2-} - \text{H}_2\text{O}$ дар 273 К

№ нуқтаҳо	Таркиби фазаи моеъ, мас.%				Таркиби фазавии таҳшинҳо
	Na_2SO_4	CaSO_4	$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$	H_2O	
e_1	4.30	-	-	95.700	Mb
e_2	-	0.176	-	99.824	Gp
e_3	-	-	23.90	76.100	Al-18
E_1^3	4.34	0.196	-	95.464	Mb + Gp
E_2^3	-	0.210	19.93	79.860	Gp + Al-18
E_3^3	5.21	-	25.16	69.630	Mb + Al-18
E_1^4	4.48	0.187	24.45	70.883	Mb + Gp + Al-18

Расми 9 диаграммаи ҳалшавандагии системаеро, ки ионҳои натрий, калсий, алюминий, сулфат ва обро дар ҳарорати 273 К дар бар мегирад, ки аз ҷониби мо таҳия шудааст, нишон медиҳад. Сохтори диаграмма дар асоси маълумоти бори аввал ба даст овардашуда анҷом дода шудааст. Дар расми 9 бо истифода аз усули марказҳои масса координатаҳои нуқтаҳои нонварианти (E_n^3 ва E_n^4), ки ба мувозинати 3- ва 4-компонентӣ мувофиқанд (n – рақами тартибии нуқта), муайян карда шуданд. Ин координатаҳо баъдан дар диаграмма визуализатсия карда шуданд.



Расми 9 – Системаи Na^+ , Ca^{2+} , $\text{Al}^{3+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$ - H_2O , диаграммаи ҳолатии он

Дар расми 9 диаграммаи ҳалшавандагии системаи обӣ, ки ионҳои Na^+ , Ca^{2+} , $\text{Al}^{3+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$ - H_2O - ро дар ҳарорати 273 K дар бар мегирад, нишон дода шудааст. Диаграмма интиқоли ифодаи соҳаҳои устувориро нишон медиҳад, яъне майдонҳои кристаллизатсияи фазаҳои мувозинати дигар, аз ҷумла андоза ва ҷойгиршавии нисбии онҳоро. Таҳқиқи равандҳои ташаккули фазаҳо ва ҳалшавӣ дар системаи обии дорои ионҳои натрий, калтсий, алюминий, сулфат ва об дар изотермаи 273 K нишон медиҳад, ки майдони таҳшинии гипс (CaSO_4) қисми назарраси диаграммаи ҳолатро ишғол мекунад, ки ин аз ҳалшавии ками он шаҳодат медиҳад. Концентратсияҳои фазагӣ дар ҳолатҳои моеъ ҳангоми кристаллизатсияи алоҳида барои майдонҳо ва кристаллизатсияи якҷоя барои хатҳо ва нуқтаҳо муқаррар карда шудаанд. Ҳамзамон, натиҷаҳои бадастомадаи таҳқиқоти илмӣ бо усулҳои кристаллоптикӣ, рентгенофазагӣ ва таҳлили химиявӣ тасдиқ карда шуданд, ки онҳоро ҳангоми коркарди партовҳои моеъи заводи алюминий, ки дар таркибашон сулфатҳои алюминий, натрий ва калтсий мавҷуданд, истифода бурдан мумкин аст.

Ҳалшавандагӣ дар нуқтаҳои нонвариантии системаи Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, HCO_3^- - H_2O барои ҳарорати 273 K

Қисмҳои таркибии системаи чоркомпонентаи Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, HCO_3^- - H_2O сулфатҳои натрий ва калтсий, инчунин гидрокарбонатҳои натрий ва калсий мебошанд, ки дар ҳарорати 273 K ба намуди $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (Gr); $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ (CaH); $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ (Mib) ва NaHCO_3 (Nh) кристаллизатсия мешаванд.

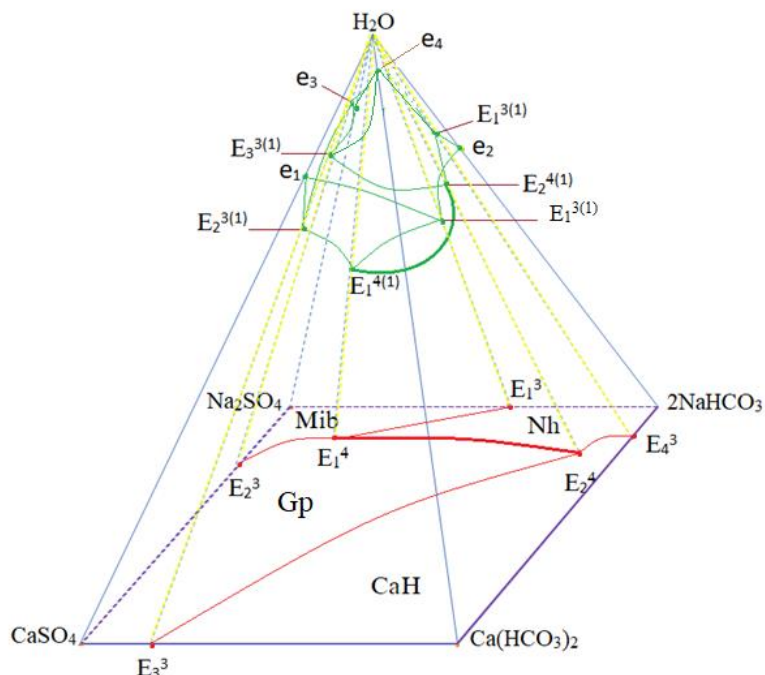
Барои тариқи эксперименталӣ таҳқиқи ҳалшавандагӣ дар элементҳои геометрии системаи Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, HCO_3^- - H_2O , ки бо усули транслятсия сохта будем реагентҳои зеринро истифода намудем: $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (т); $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ (т); $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ (т) ва NaHCO_3 (т).

Маълумот дар бораи ҳалшавандагӣ дар нуқтаҳои нонвариантии системаи секомпонента, ки аз адабиёт гирифта шудаанд ва сатҳҳои пешниҳодкардаи мо барои системаи чоркомпонента дар ҷадвали 4 оварда шудаанд.

Ҷадвали 4 – Изотермаи ҳалшавандагӣ дар шаклҳои геометрии системаи тартиби дуум, ки аз ионҳои калсий, натрий, сулфат, гидрокарбонат ва об дар ҳарорати 273 К

№ нукта	Таркиби фазаи моеъ, масса бо %					Фазаҳои саҳти мувозинатӣ
	Na ₂ SO ₄	NaHCO ₃	CaSO ₄	Ca(HCO ₃) ₂	H ₂ O	
e ₁	4.300	—	—	—	95.700	Mib
e ₂	—	6.490	—	—	93.510	Nh
e ₃	—	—	0.176	—	99.824	Gp
e ₄	—	—	—	0.144	99.856	CaH
E ₁ ³	2.570	5.820	—	—	91.610	Mib + Nh
E ₂ ³	4.340	—	0.196	—	95.464	Mib + Gp
E ₃ ³	—	—	0.217	0.083	99.700	CaH + Gp
E ₄ ³	—	4.890	—	0.109	95.001	Nh + CaH
E ₁ ⁴	3.430	5.220	0.326	—	91.024	Mib + Nh + Gp
E ₂ ⁴	—	4.865	0.131	0.153	94.851	Nh + CaH + Gp

Диаграммаи ҳалшавандагии системаи чоркомпонентаи тартиби дуум барои ҳарорати 273 К аз ионҳои калсий, натрий, сулфат, гидрокарбонат ва об иборат аст. Он бори аввал дар асоси маълумотҳои ҷадвали 4 (расми 10) сохта шудааст.



Расми 10 – Системаи тартиби дууми Na⁺, Ca²⁺ || SO₄²⁻, HCO₃⁻ - H₂O. Диаграммаи ҳалшавандагӣ дар изотермаи 273 К

Нуктаи фигуративии диаграммаи ҳолатии омӯхташуда, ин баҳамрасии меҳвари координатҳо, яъне тарафҳои чоркунҷа ва омехтаи дохилӣ мебошад.

Аз расми 10-и системаи чоркомпонентаи Ca²⁺, Na⁺ || SO₄²⁻, HCO₃⁻ - H₂O дар изотермаи 273 К маълум мешавад, ки кристаллизатсияи гидрокарбонати калсий қисми зиёди онро ишғол мекунад. Ин аз ҳалшавандагии ками гидрокарбонати калсий дар муқоиса бо дигар фазаҳои саҳти мувозинатӣ дар шароити муқарраршуда шаҳодат медиҳад. Мирабилит қисми ками диаграммаи системаро ишғол мекунад, ки ин ҳалшавандагии зиёди намаки мирабилитро ишора мекунад. Ҳамзамон, натиҷаҳои бадастомадаи таҳқиқоти илмӣ бо усулҳои кристалооптикӣ ва химиявӣ тасдиқ карда шудаанд, ки онҳоро дар регенератсияи партовҳои моеъи саноати алюминий, ки дорои

сулфатҳо ва гидрокарбонатҳои натрий ва калсий мебошанд, истифода бурдан мумкин аст.

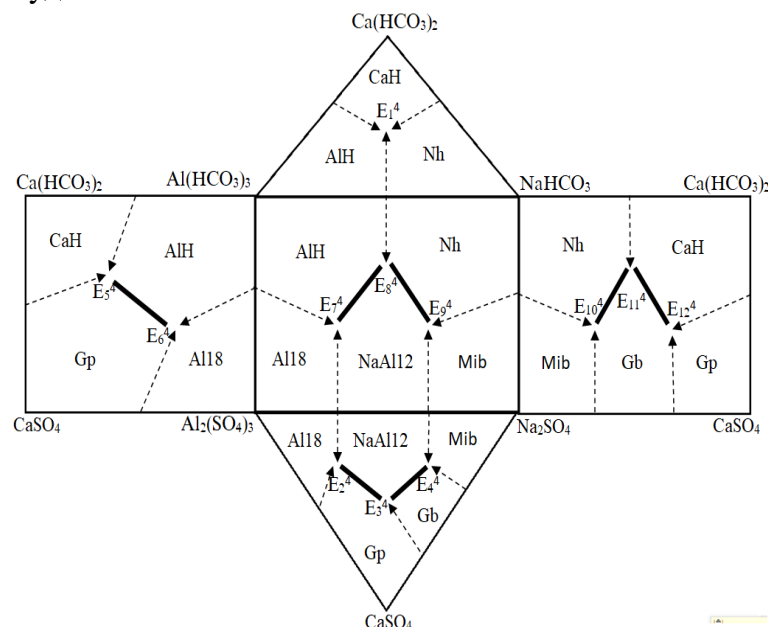
Фазаҳосилшавӣ дар системаи $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+}, \text{Al}^{3+} \parallel \text{SO}_4^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$

Натиҷаҳои омӯзиши фазаҳосилшавӣ дар сатҳи чоркомпонентагии системаи $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+}, \text{Al}^{3+} \parallel \text{SO}_4^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$ баррасӣ гардидааст. Барои системаи панҷкомпонентаи таҳқиқшаванда нуқтаҳои нонвариантии зерин ва фазаҳои саҳти дар мувозинатбудаашон хос мебошанд, муайян шудааст (ҷад. 5).

Ҷадвали 5 – Нуқтаҳои нонвариантии сатҳи чоркомпонентагии системаи $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+}, \text{Al}^{3+} \parallel \text{SO}_4^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$ дар ҳарорати 298 К

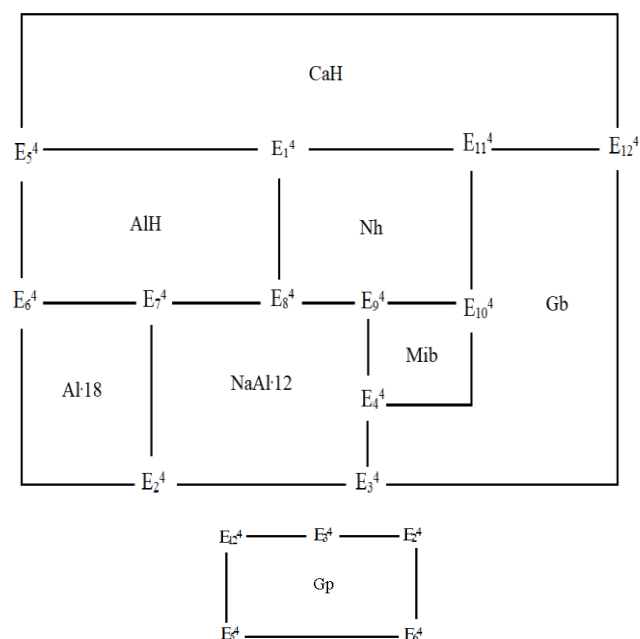
Нуқтаҳои нонварианти	Система	Фазаҳои саҳти дар мувозинат буда
E_1^4	$\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+}, \text{Al}^{3+} \parallel \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$	$\text{Nh} + \text{CaH} + \text{AlH}$
E_2^4 E_3^4 E_4^4	$\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+}, \text{Al}^{3+} \parallel \text{SO}_4^{2-} - \text{H}_2\text{O}$	$\text{NaAl} \cdot 12 + \text{Gp} + \text{Al} \cdot 18$ $\text{NaAl} \cdot 12 + \text{Gp} + \text{Gb}$ $\text{NaAl} \cdot 12 + \text{Mib} + \text{Gb}$
E_5^4 E_6^4	$\text{Ca}^{2+}, \text{Al}^{3+} \parallel \text{SO}_4^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$	$\text{Gp} + \text{CaH} + \text{AlH}$ $\text{Gp} + \text{AlH} + \text{Al} \cdot 18$
E_7^4 E_8^4 E_9^4	$\text{Na}^+, \text{Al}^{3+} \parallel \text{SO}_4^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$	$\text{NaAl} \cdot 12 + \text{AlH} + \text{Al} \cdot 18$ $\text{Nh} + \text{AlH} + \text{NaAl} \cdot 12$ $\text{NaAl} \cdot 12 + \text{Mib} + \text{Nh}$
E_{10}^4 E_{11}^4 E_{12}^4	$\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$	$\text{Mib} + \text{Nh} + \text{Gb}$ $\text{Nh} + \text{CaH} + \text{Gb}$ $\text{Gb} + \text{CaH} + \text{Gp}$

Дар асоси натиҷаҳои ҷадвали 5 қисми намакии диаграммаи фазаҳосилшавии системаи $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+}, \text{Al}^{3+} \parallel \text{SO}_4^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$ дар сатҳи чоркомпонентагӣ сохта шуда, (рас. 11) оварда шудааст.



Расми 11 – Системаи $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+}, \text{Al}^{3+} \parallel \text{SO}_4^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$. Диаграммаи фазаҳосилшавӣ ҳамчун «Призмаи кушода» барои ҳарорати 298 К дар сатҳи 4-компонентагӣ.

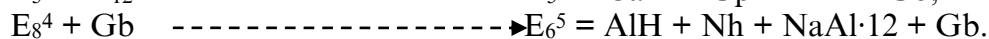
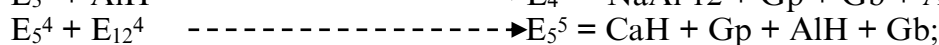
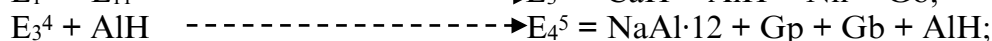
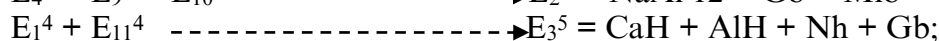
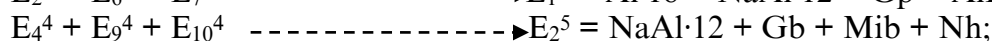
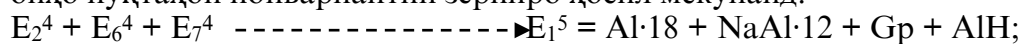
Кристаллизатсияи фазаҳои саҳти алоҳидаи мувозинатии системаи тартиби дуум дар якчанд системаҳои 4-компонента ба амал меояд. Майдонҳои онҳо муттаҳид мешаванд. Ин сохтори диаграммаро ба таври назаррас содда мекунад. Айни замон, дар маҷмӯъ, маълумот тағйир намеёбад. Диаграммаи фазаҳосилшавии системаи омӯхташуда барои ҳарорати 298 К дар расми 12 оварда шудааст.



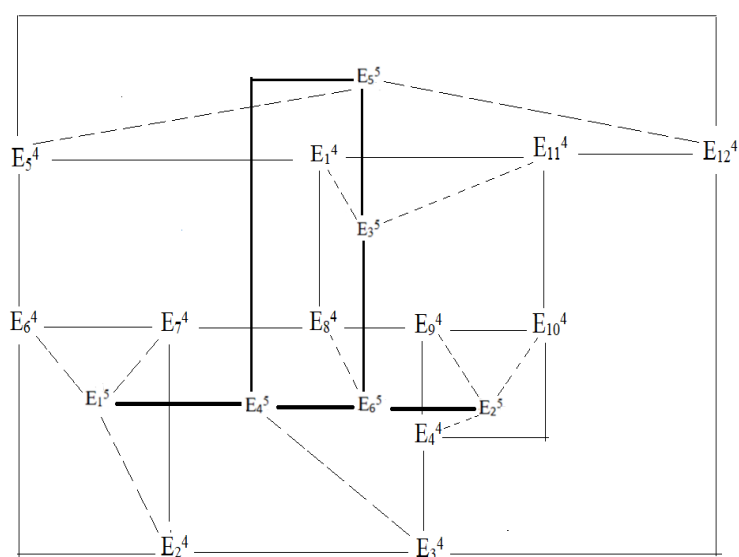
Расми 12 – Диаграммаи схематикии фазаҳосилшавии системаи Na^+ , Ca^{2+} , $\text{Al}^{3+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, HCO_3^- - H_2O барои ҳарорати 298 К дар сатҳи чоркомпонентагӣ

Истифодаи усули транслятсия нишон медиҳад, ки дар сатҳи панҷкомпонентагӣ

онҳо нуқтаҳои нонвариантии зеринро ҳосил мекунанд:



Фазаҳосилшавӣ дар системаи Na^+ , Ca^{2+} , $\text{Al}^{3+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, HCO_3^- - H_2O бори аввал бо истифода аз методи транслятсия омӯхта шуд. Диаграммаи он дар ҳарорати 298 К сохта шуд (рас. 13). Дар ин диаграмма ҳамаи нуқтаҳои нонвариантии имконпазирӣ система нишон дода шудааст.



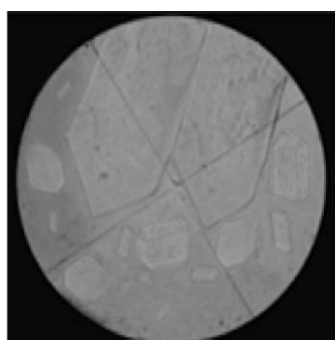
Расми 13 – Системаи Na^+ , Ca^{2+} , $\text{Al}^{3+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, HCO_3^- - H_2O дар ҳарорати 298 К дар сатҳи чор-панҷкомпонентагӣ. Диаграммаи фазаҳосилшавии он

Кристаллизатсияи фазаҳои алоҳидаи мувозинатии саҳти системаи тадқиқшуда дар якҷанд системаҳои чоркомпонента ба амал меояд. Майдонҳои онҳо муттаҳид мешаванд. Ин сохтори диаграммаро ба таври назаррас содда мекунад, ки ба фазаҳои саҳти дар аввал ё охири раванд ташаккулёфта асос ёфтааст.

**Ҳалшавандагӣ дар нуқтаҳои нонвариантии системаи
Na⁺, Ca²⁺ || SO₄²⁻, HCO₃⁻ - H₂O дар изотермаи 298 К**

Бо тариқи эксперименталӣ таҳқиқи ҳалшавандагӣ дар элементҳои геометрии системаи Na⁺, Ca²⁺ || SO₄²⁻, HCO₃⁻ - H₂O, ки бо усули транслятсия сохта будем реагентҳои зеринро истифода намудем: Na₂SO₄·10H₂O (т); Ca(HCO₃)₂ (т); CaSO₄·2H₂O (т) ва NaHCO₃ (т).

Таҷрибаҳо дар маҳлулҳои моделӣ гузаронида шуданд ва ба шартҳои усули транслятсия дар системаҳои чоркомпонента мувофиқат мекунанд. Ҳарорати омехтаро бо ёрии термостати маркаи LT-TWC/22 ба роҳ монда, он тавассути ҳароратсанҷи контакти доимӣ нигоҳ дошта, бо ёрии омехтакунаки PD – 09 то ба мувозинат омадани маҳлул омехта намудем. Кристаллизатсияи фазаҳои саҳтро бо ёрии микроскопи рақамии тамғаи «ПОЛАМ – Р 311» мушоҳида намуда, бо ёрии аксбардори «SONY Alpha ILCE-7M3 body» аксгирӣ намудем. Таҳлили химиявии фазаи моеъро таҳлил намуда, натиҷаҳои таҳлиро дар ҷадвали 6, ҳамзамон натиҷаи таҳлили кристаллооптикаи сатҳи чоркомпонентаи нуқтаҳои нонвариантии системаи чоркомпонентаи муовизаи Na⁺, Ca²⁺ || SO₄²⁻, HCO₃⁻ - H₂O-ро барои ҳарорати 298 К дар расми 14 оварда шудааст.



Mib+Gp+Gb



CaH+Gp+Gb



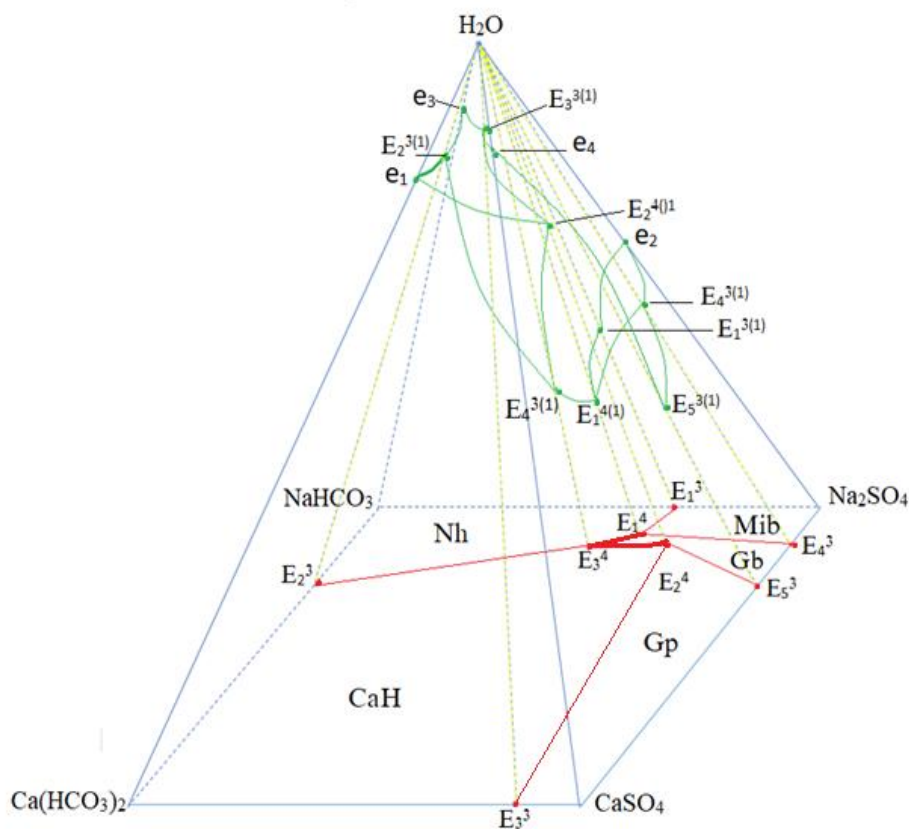
Nh+Gb+CaH

Расми 14 – Микроаксҳои фазаҳои саҳти мувозинатии системаи
Na⁺, Ca²⁺ || SO₄²⁻, HCO₃⁻ - H₂O дар ҳарорати 298 К

Ҷадвали 6 – Системаи тартиби дуҷуми Na⁺, Ca²⁺ || SO₄²⁻, HCO₃⁻ - H₂O. Ҳалшавандагии дар шаклҳои геометрии система дар ҳарорати 298 К

№ нуқта	Таркиби фазаи моеъ, мас. бо %					Таркиби фазаи саҳт
	NaHCO ₃	Na ₂ SO ₄	Ca(HCO ₃) ₂	CaSO ₄	H ₂ O	
e ₁	9.310	-	-	-	90.690	Nh
e ₂	-	21.900	-	-	78.100	Mib
e ₃	-	-	0.0160	-	99.984	CaH
e ₄	-	-	-	0.219	99.780	Gp
E ₁ ³	4.160	20.680	-	-	75.160	Mib+Nh
E ₂ ³	4.890	-	0.0109	-	95.090	Nh+CaH
E ₃ ³	-	-	0.0168	0.186	99.797	CaH+Gp
E ₄ ³	-	21.750	-	0.197	78.050	Mib+Gp
E ₅ ³	-	25.780	-	0.188	74.030	Gb+Gp
E ₁ ⁴	5.200	28.380	-	0.270	66.150	Mib+Nh+Gb
E ₂ ⁴	-	25.140	0.0136	0.184	74.660	Gb+CaH+Gp
E ₃ ⁴	7.120	24.400	0.0163	-	68.460	Nh+CaH+Gb

Дар асоси маълумотҳои ҷадвали 6 диаграммаи ҳалшавандагии системаи чоркомпонентаи тарби дуҷуми дар 298 К сохта шудааст. Система аз ионҳои Na^+ , Ca^{2+} || SO_4^{2-} , HCO_3^- - H_2O иборат мебошанд (рас. 15).



Расми 15 – Диаграммаи ҳалшавандагии системаи иборат аз ионҳои калсий, натрий сулфат, гидрокарбонат ва об дар изотермаи 298 К.

Аз таҳқиқи диаграмма аён аст, ки нуқтаи фигуративӣ ба пайваستшавии остои координатӣ (тарафҳои чоркунҷа) ва омехтаи дохили диаграмма мувофиқ аст.

Дар расми 15 диаграммаҳои системаи чоркомпонентаи Ca^{2+} , Na^+ || SO_4^{2-} , HCO_3^- дар изотермаи 298 К нишон дода шудааст. Дар он дида мешавад, ки ҳудуди кристаллизатсияи гидрокарбонати калсий $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ қисми калони диаграммаро ишғол мекунад, ки ин ҳалшавандагии пасти $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ -ро нисбат ба дигар фазаҳои саҳти мувозинатӣ дар шароити додашуда тасдиқ мекунад. Мирабилит қисми ками диаграммаи системаро ишғол мекунад, ки ин аз ҳалшавандагии зиёди ин намак дарак медиҳад.

Барои муайян намудани мувозинати фазавии фазаҳои саҳт дар системаи дар боло таҳлилшуда, усули кристаллопикӣ истифода шудааст. Мушоҳидаи фазаҳои саҳти мувозинатии система тавассути микроскоп ба таври визуалӣ амалӣ карда шуд. Ҳангоми ҳуҷҷатгузорӣ аксбардорӣ истифода шудааст. Дар расми 15 микроаксҳои фазаҳои алоҳидаи саҳт нишон дода шудаанд. Инчунин, кристаллизатсияи муштаракӣ ин фазаҳо, ки дар нуқтаҳои нонвариантии сатҳҳои се ва чоркомпонента мушоҳида шудаанд, нишон дода шудааст. Натиҷаҳои таҳқиқоти гузаронидашуда оид ба равандҳои фазаҳосилшавӣ ва ҳалшавандагӣ дар системаи Na^+ , Ca^{2+} || SO_4^{2-} , HCO_3^- - H_2O дар изотермаи 298 К ва сохтори диаграмма аз он шаҳодат медиҳад, ки сарҳади кристаллизатсияи бикарбонати калсий ($\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$) қисми зиёди диаграммаро фаро мегирад, ки ин ҳалшавандагии ками ин пайвастагиро дар шароити додашуда исбот мекунад. Дар ҷараёни

таҳқиқот мо усулҳои кристаллоптикаӣ ва химиявии таҳлили системаҳоро истифода бурдем. Дар вақти таҳияи технологияҳо барои регенерацияи партовҳои моеъи заводи алюминий қонуниятҳои ошкоршуда истифода хоҳанд шуд. Қайд кардан зарур аст, ки таркиби фазаҳои моеъи заводи алюминий бикарбонатҳо ва сульфатҳои натрий ва калсийро дар бар мегирад.

ХУЛОСАҲОИ УМУМӢ

1. Фазаҳосилшавии системаи физико-химиявии муовизаи Na^+ , Ca^{2+} , $\text{Al}^{3+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, HCO_3^- - H_2O , зерсистемаҳои чоркомпонентаи онро ташкилкунандаи: Na^+ , Ca^{2+} , $\text{Al}^{3+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$ - H_2O ; Na^+ , Ca^{2+} , $\text{Al}^{3+} \parallel \text{HCO}_3^-$ - H_2O ; Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, HCO_3^- - H_2O ; Na^+ , $\text{Al}^{3+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, HCO_3^- - H_2O ва Ca^{2+} , $\text{Al}^{3+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, HCO_3^- - H_2O барои изотермаҳои 273 ва 298 К пешгуи карда шуда, маротибаи аввал диаграммаҳои сарбастаи онҳо сохта шудааст [5-М, 7-М, 9-М, 10-М].
2. Ҳамаи фазаҳосилшавӣ дар шаклҳои геометрии системаи таҳқиқшаванда муайян гардид. Инъикос шуд, ки: майдонҳои дивариантӣ 12 ва 19; хатҳои моновариантӣ 10 ва 18; нуқтаҳои нонвариантӣ 3 ва 6 барои системаи физико-химиявии тартиби дуҷуми панҷкомпонентаи Na^+ , Ca^{2+} , $\text{Al}^{3+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, HCO_3^- - H_2O ҳамчун ифодаҳои геометрии мутаносибан барои изотермаҳои 273 ва 298 К ба назар мерасанд [8-М, 11-М].
3. Ҳамаи диаграммаҳои фазаҳосилшавӣ (комплекси фазагӣ)-и системаи бисёркомпонентаи Na^+ , Ca^{2+} , $\text{Al}^{3+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, HCO_3^- - H_2O бо усули тарнслятсия сохташуда ба майдонҳои кристаллизатсияи фазаҳои алоҳида (сатҳи чоркомпонентагӣ) ва майдонҳои кристаллизатсияи ду фаза (сатҳи панҷкомпонентагӣ) фрагментатсия карда шудаанд [11-М, 12-М].
4. Ҳалшавандагии системаҳои чоркомпонентаи: Na^+ , Ca^{2+} , $\text{Al}^{3+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$ - H_2O (273 К) ва Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, HCO_3^- - H_2O (273 ва 298 К) омӯхта шуда, аввалин шуда диаграммаи ҳолатии онҳо сохта шудаанд. Далелҳои ноилгаштаи ҳалшавандагии илмӣ тавассути усулҳои рентгенофазавӣ, кристаллооптикаӣ ва химиявии таҳлил тасдиқ гардидаанд, қомилан бо далелҳои, ки бо усули тарнслятсия ба даст оварда шудаанд, мувофиқат мекунад. Дар асоси диаграммаи мазкур схемаи принципалии технологӣ тартиб дода шудааст [3-М, 4-М, 5-М, 12-М].
5. Натиҷаҳои ноилгаштаи назариявӣ ва таҷрибавӣ метавонад ҳамчун маводи маълумотномавӣ барои таҳқиқи системаҳои бисёркомпонента истифода шавад. Инчунин он ҳамчун асоси илмӣ қоркарди ашёи табиӣ полиминералӣ ва техникаи мураккаби аз сульфатҳо ва гидрокарбонатҳои натрий, калсий ва алюминий ташкилёфта буда метавонад [1-М, 2-М, 5-М, 6-М, 11-М].

Тавсияҳо оид ба истифодаи амалии натиҷаҳои қори диссертатсионӣ

Дарки қонуниятҳои ташаккулёбии фазаҳо дар системаи бисёркомпонентаи Na^+ , Ca^{2+} , $\text{Al}^{3+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, HCO_3^- - H_2O яке аз лаҳзаҳои асосии тадқиқоти гузаронидашуда ба ҳисоб меравад. Ин аз он вобаста аст, ки системаи мазкур пайвастагҳои муҳимро, ба монанди мирабилит ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$), нахколит (NaHCO_3), гипс ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), гидрокарбонати калсий ($\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$), октадекагидрати сульфати алюминий ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$) ва гидрокарбонати алюминий ($\text{Al}(\text{HCO}_3)_3$)-ро дар бар мегирад, ки вобаста ба истифодаашон дар соҳаҳои гуногуни саноат нақши муҳим мебозанд. Онҳоро чунин истифода бурдан мумкин аст: сульфати натрийи беоб дар саноати шишасозӣ, истеҳсоли маводи шустушӯи моеъ, саноати чармгарӣ ва ғайра; гидрокарбонати натрий дар соҳаҳои кимиё, ҳурукворӣ, тиббӣ ва ғайра; сульфати калсий дар истеҳсоли гипс, ҳамчун коагулянт дар истеҳсоли тофу; октадекагидрати сульфати алюминий ҳамчун коагулянт барои тозакунии об, дар

истеҳсоли коғаз, саноати чармгарӣ ва ғайра; гидрокарбонати алюминий дар тиб ҳамчун доруи зидди кислота, дар косметика ҳамчун хамираи дандон, дар саноат барои тозакунии об, ҳамчун катализатор барои ранг кардани матоъҳо ва ғайра. Моддаҳои дар боло зикршуда дар партовҳои моеъи корхонаи истеҳсоли алюминий, ки дар шаҳри Турсунзода ҷойгир аст, мавҷуданд ва онҳо ҳамчун системаҳои бисёркомпонента вомехӯранд. Натиҷаҳои таҳқиқи мувозинати фазаӣ дар системаи 5-компонентаи Na^+ , Ca^{2+} , $\text{Al}^{3+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, HCO_3^- - H_2O метавонанд ҳамчун асоси илмӣ барои татбиқи технологияҳои коркарди ҳам полиминералӣ ва ҳам ашёи хоми мураккаби техникӣ, ки ба таркиби онҳо сульфатҳои натрий, гидрокарбонатҳои натрий, инчунин карбонатҳо ва сульфатҳои калсий ва алюминий дохил мешаванд, истифода шаванд.

Ҳангоми ҳалли масъалаҳои мушаххаси амалӣ, диаграммаи фазаҳосилшавии системаи 5-компонентаи таҳқиқшаванда дар ҳар гуна дараҷаи вариантҳои система метавонад аз рӯи ҳудуди кристаллизатсияи пайвастагиҳои алоҳида ба қисмҳо ҷудо карда шавад.

ФЕҲРИСТИ ИНТИШОРОТИ ИЛМИИ ДОВТАЛАБИ ДАРЁФИ ДАРАҶАИ ИЛМӢ АЗ РӢИИ МАВЗУИ ДИССЕРТАТСИЯ

Нахустпатент ба ихтироот

[1-М]. Малый патент № TJ 1341 РТ. Способ получения декагидрата карбоната натрия из жидких отходов алюминиевого производство / М.Т.Жумаев, И.М.Низомов, Х.Р.Махмадов, **Н.В.Олимджонова**, Д.З.Музафарова; патентообладатель – Жумаев М.Т. - № 2201674 дата подачи заявки 05.05.2022. Зарегистрировано 30.01.2023.

[2-М]. Малый патент № TJ 1454 РТ. Способ получения нахколита из жидких отходов алюминиевого производство / М.Т. Жумаев, М. Раҳимова, Х.Р. Маҳмадов, **Н.В. Олимҷонова**, Д.З. Музафарова; патентообладатель – Жумаев М.Т. - № 2301862 дата подачи заявки 17.07.2023. Зарегистрировано 04.12.2023.

Мақолаҳои дар маҷаллаҳои илмӣ тавсияшудаи КОА-и назди

Президенти Ҷумҳурии Тоҷикистон нашршуда:

[3-М]. **Олимҷонова, Н.В.** Таҳлили муқоисавии сохтори комплекси фазагии системаи $\text{Na}_2\text{SO}_4\text{--Na}_2\text{CO}_3\text{--NaHCO}_3\text{--H}_2\text{O}$ дар ҳароратҳои 75 ва 100 °С / **Н.В. Олимҷонова**, Л. Солиев, М.Т. Жумаев, Р.О. Тураев, Х.Р. Махмадов // Паёми Донишгоҳи миллии Тоҷикистон. Бахши илмҳои табиӣ. -2019. -№ 2. -С.179-184.

[4-М]. **Олимджонова, Н.В.** Фазовый комплекс взаимной системы $\text{Na,Ca} \parallel \text{SO}_4, \text{CO}_3\text{--H}_2\text{O}$ при 75 и 100 °С / **Н.В. Олимджонова**, Л. Солиев, М.Т. Жумаев, Х.Р. Махмадов, Д.З. Музафарова // ДАН Республики Таджикистан. -2020. -Т.63. -№9-10. -С.618-625.

[5-М]. **Олимҷонова, Н.В.** Таҳлили муқоисавии диаграммаи ҳалшавандагии системаи $\text{Na,Ca} \parallel \text{SO}_4, \text{CO}_3\text{--H}_2\text{O}$ дар ҳароратҳои 0, 25 ва 50 °С / **Н.В. Олимҷонова**, Л. Солиев, М.Т. Жумаев, Х.Р. Махмадов, Д.З. Музафарова // Паёми Донишгоҳи омузгорӣ: Бахши илмҳои табиатшиносӣ. -2021. -№1(10-11). -С.253-257.

[6-М]. **Олимджонова, Н.В.** Растворимость системы $\text{Na}_2\text{SO}_4\text{--Na}_2\text{CO}_3\text{--NaHCO}_3\text{--H}_2\text{O}$ при 75 °С / **Н.В. Олимджонова**, Л. Солиев, М.Т. Жумаев, О.Р. Тураев, Х.Р. Махмадов // Известия НАНТ. -2021. -№1(182). -С.82-89.

[7-М]. **Олимджонова, Н.В.** Фазообразование системе в $\text{Na,Ca,Al} \parallel \text{SO}_4, \text{HCO}_3\text{--H}_2\text{O}$ при 298 К / **Н.В.Олимджонова**, М.Т.Жумаев, Л.Солиев. // Известия НАНТ. -2023. -№2(191). -С.46-54.

[8-М]. **Олимджонова, Н.В.** Сравнение фазовых равновесий в системе $\text{Na}_2\text{SO}_4\text{--Al}_2(\text{SO}_4)_3\text{--CaSO}_4\text{--H}_2\text{O}$ при температуре 273 и 298 К / **Н.В. Олимджонова**, М.Т. Джумаев, Д.З. Музафарова // Вестник Филиала Московского государственного университета. -2023. -Т.1. -№3(33). -С.53-61.

[9-M]. **Олимҷонова, Н.В.** Сатҳи чоркомпонентаи мувозинатҳои фазагии системаи $K, Ca//SO_4, CO_3, HCO_3, F-H_2O$ дар ҳарорати 25 °C. / **Н.В. Олимҷонова, Ҷ.М. Мусочонзода, Л.Ч. Имомова, Д.З. Музафарова, М.Т. Жумаев, Л. Солиев** // Паёми политехникӣ. Бахши илмҳои муҳандисӣ. -2024. -№3(66). -С.159-165.

[10-M]. **Олимджонова, Н.В.** Изотерма фазообразования в системе $Na^+, Ca^{2+} // SO_4^{2-}, HCO_3^- - H_2O$ при 298 К / **Н.В. Олимджонова, М.Т. Жумаев, Л. Солиев** // Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. -№ 1(65). -2024. -С.108-111.

[11-M]. **Olimjonova, N.V.** Phase formation in the system $Na^+, Ca^{2+}, Al^{3+} // SO_4^{2-}, HCO_3^- - H_2O$ at 273 K / **N.V. Olimjonova, D.Z. Muzafarova, M.T. Jumaev, H.R. Mahmudov, Sh.S. Davlatshozoda, I.M. Nizomov** // E3S Web of Conferences International Scientific Conference Energy Management of Municipal Facilities and Environmental Technologies (EMMFT-2024). Volume 592 (2024). (**Scopus**).

[12-M]. **Олимджонова, Н.В.** Сравнение растворимости в системе $Na, Ca // SO_4, HCO_3 - H_2O$ при 273 и 298 К / **Н.В. Олимджонова, М.Т. Жумаев, Д.З. Музафарова, Дж.М. Мусоджонзода** // Известия НАНТ. -2024. -№4(197). -С.85-91.

Фишурдаҳои мақолаҳо дар маводи конференсҳои илмӣ:

[13-M]. **Олимджонова, Н.В.** Строение диаграммы фазового комплекса системы $Na_2SO_4 - Na_2CO_3 - NaHCO_3 - H_2O$ при 75 и 100 °C / **Н.В. Олимджонова, М.Т. Жумаев, Л. Солиев, Д.З. Музафарова, Х.Р. Махмадов** // Материалы IV Всероссийской молодежной научной конференции с международным участием «Экологобезопасные и ресурсосберегающие технологии и материалы». -Улан-Уде, 2020. -С.69-71.

[14-M]. **Олимҷонова, Н.В.** Комплекси фазагии системаи $Na, Ca // SO_4, CO_3 - H_2O$ дар ҳароратҳои 75 ва 100 °C / **Н.В. Олимҷонова, Л. Солиев, Х.Р. Махмадов, М.Т. Жумаев, Д.З. Музафарова** // Маводи конференсияи байналмилалӣ илмию амалӣ дар мавзӯи «Проблемаҳои муосири саноати металлургӣ» -Душанбе, 2021. -С.160-163.

[15-M]. **Олимджонова, Н.В.** Равновесные твёрдые фазы четверных невариантных точек системы $Na, Ca // SO_4, CO_3, HCO_3 - H_2O$ при 0 °C / **Н.В. Олимджонова, М.Т. Жумаев, Л. Солиев, Х.Р. Махмадов** // Сборник трудов Всероссийского симпозиума и школы-конференции молодых ученых «Физико-химические методы в междисциплинарных экологических исследованиях». –Москва, 2021. -С.262-263.

[16-M]. **Олимджонова, Н.В.** Фазовые равновесия и растворимость в системе $Na_2SO_4 - Na_2CO_3 - NaHCO_3 - H_2O$ при 75 °C / **Н.В. Олимджонова, Л. Солиев, М.Т. Жумаев, Х.Р. Махмадов** // Материалы Всероссийской научной конференции с международным участием «IV Байкальский материаловедческий форум». -Улан-Удэ, 2022. -С.125-126.

[17-M]. **Олимджонова, Н.В.** Сравнение фазовых равновесий в системе $Na_2SO_4 - Al_2(SO_4)_3 - CaSO_4 - H_2O$ при температуре 273 и 298 К, / **Л. Солиев, М.Т. Жумаев, Н.В. Олимджонова, Д.З. Музафарова** // Материалы международной научно-практической конференции “Развитие новых направлений в химии и химической технологии”. — Душанбе, -2023. -С. 157-161.

[18-M]. **Олимджонова, Н.В.** Изотерма фазообразования в четырёхкомпонентной системе $Na, Ca // SO_4, HCO_3 - H_2O$ при 298 К / **Н.В. Олимджонова, Л. Солиев, М.Т. Жумаев, Н.З. Ноибова** // Всероссийская конференция и школа молодых учёных “Физико-химические методы в междисциплинарных экологических исследованиях”. – Москва, -2023. -С.168-169.

[19-M]. **Олимҷонова, Н.В.** Фазаҳосилшавӣ дар системаи $Na, Ca, Al // SO_4, CO_3 - H_2O$ дар изотермаи 273 К, / **Н.В. Олимҷонова, Л. Солиев, М.Т. Жумаев**. // Конференсияи Ҷумҳуриявӣ илмӣ-амалӣ дар мавзӯи “Вазъи кунунӣ ва дурнамои таҳлили физико-химиявӣ. –Душанбе, -2023. -С.209-215.

[20-M]. **Олимджонова, Н.В.** Растворимость системы $Na, Ca // SO_4, CO_3 - H_2O$ при 273 и 298 К. / **Н.В. Олимджонова, Д.З. Музафарова, М.Т. Жумаев, Л. Солиев** // Сборник материалов XIX Нумановские чтения на тему “Развитие фундаментальной и

прикладной химии и её вклад в индустриализацию страны”. –Душанбе, -2024. -С.63-66.

[21-M]. **Olimjonova, N.V.** Concentrated parameters of the formation of modern solid phases of Na,Ca,Al//SO₄, HCO₃-H₂O systems at 273 K. / **N.V. Olimjonova, M.T. Jumaev, L. Soliev** // Collection articles by participants of the international scientific and practical conference "Chemical Science and Education, problems and prospects of development". – Makhachkala, -2024. -pp. 61-66.

[22-M]. **Олимджонова, Н.В.** Концентрационные параметры образования равновесных твёрдых фаз системы Na⁺,Ca²⁺,Al³⁺||SO₄²⁻,HCO₃⁻-H₂O при 273 К. / **Н.В. Олимджонова, М.Т. Жумаев, Л. Солиев** // XXII Менделеевский съезд по общей и прикладной химии. –Сириус, -2024. –Т. 6. -С.64.

[23-M]. **Олимджонова, Н.В.** Прогнозирование фазовых равновесий в системе Na,Ca,Al||SO₄,HCO₃-H₂O при 298 К. / М.Т. Жумаев, **Н.В. Олимджонова, Л. Солиев** // IV Международной научной конференции «Вопросы физической и координационной химии». –Душанбе, -2024. -С. 349-353.

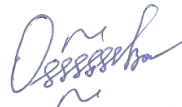
[24-M]. **Олимҷонова, Н.В.** Таҳлили муқоисавии фазаҳосилшавӣ дар системаи Na⁺,Al³⁺||SO₄²⁻,HCO₃⁻-H₂O дар 273 ва 298К / **Н.В.Олимҷонова** // Конференсияи Ҷумҳуриявии илмӣ-амалӣ дар мавзӯи “Вазъи кунунӣ ва дурнамои таҳлили физико-химиявӣ. -Душанбе, -2025. -С.188-191.

[25-M]. **Олимджонова, Н.В.** Сравнение фазообразований в системе Na,Al||SO₄,HCO₃-H₂O при 273 и 298 К / IX Международная научно-практическая конференция «Булатовские чтения». –Краснаярск, -2025. С. 173.

[26-M]. **Olimjonova, N.V.** Equilibrium phase diagram and stable phases present in the system Na,Ca||SO₄,HCO₃-H₂O at temperatures of 273 and 298 K / **N.V.Olimjonova, M.T.Jumaev, L.Soliev** // Proceedings of the All-Russian scientific conference with international participation "IV Baikal Materials Science Forum". -Ulan-Ude, -2025. –С. 214.

**ТАДЖИКСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ПЕДАГОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМ. САДРИДДИНА АЙНИ**

На правах рукописи



УДК: 546.1+546.722

ББК: 24.1+24.13

О-48

ОЛИМДЖОНОВА Нилуфар Вахобджоновна

**РАСТВОРИМОСТЬ И ФАЗООБРАЗОВАНИЕ СИСТЕМЫ
 Na^+ , Ca^{2+} , Al^{3+} || SO_4^{2-} , HCO_3^- - H_2O ПРИ 273 И 298 К**

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени

доктора философии (PhD) – доктор по специальности 6D060600 – Химия
(6D060601 – Неорганическая химия)

ДУШАНБЕ – 2025

Диссертация выполнена в научно-исследовательской лаборатории «Исследование многокомпонентных систем методом трансляции им. заслуженного деятеля науки и техники Таджикистана, доктора химических наук, профессора Лутфулло Солиева» при кафедре «Общей и неорганической химии» Таджикского государственного педагогического университета им. Садриддина Айни.

**Научный
руководитель:**

Жумаев Маъруфжон Тағоймуротович,
кандидат химических наук, доцент

**Официальные
оппоненты:**

Абулхаев Владимир Джалолович,
доктор химических наук, профессор,
заведующий лаборатории «Химия
гетероциклических соединений» Института
химии им. В.И. Никитина Национальной
Академии наук Таджикистан;

Рахимов Фаррух Каюмович,
кандидат химических наук, доцент, заведующий
кафедрой «Металлургия» Таджикского
технического университета им. академика М.С.
Осими.

Ведущая организация:

Государственное учреждение «Научно-
исследовательский институт металлургии»
Открытое акционерное общество «Таджикская
алюминиевая компания»

Защита диссертации состоится «18» сентября 2025 г. в 13⁰⁰ часов на заседании Диссертационного совета 6D. КОА – 010 при Таджикском национальном университете.

Адрес: 734025, г. Душанбе, проспект Рудаки, 17. E-mail: nazira@mail.ru

С содержанием диссертации можно ознакомиться на сайте www.tnu.tj и в центральной библиотеке Таджикского национального университета по адресу: 734025, г. Душанбе, проспект Рудаки, 17.

Автореферат разослан «__» _____ 2025 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат химических наук, доцент



Бекназарова Н.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Развитие химической промышленности требует переработки минерального сырья и производства новых материалов, что связано с изучением соответствующих химических систем. При этом, знание закономерностей взаимодействия химических веществ в сочетании является требованием времени, и они изучаются методами физико-химического анализа, предложенными академиком Н.С. Курнаковым, его учениками и последователями. Такой способ изучения свойств химических систем позволяет исследовать происходящие в них превращения, особенно фазовые, а также образование кристаллогидратных химических систем, новых веществ и другие изменения, влияющие на свойства соединений без их разделения и выявлять соответствующие закономерности этих процессов.

Минеральное сырье – это полезные ископаемые, используемые в производстве и играющие важную роль для промышленности. В настоящее время большую часть промышленного сырья составляют руды.

После добычи руды перерабатываются, и наряду с получением необходимых веществ, выделяются их отходы. Промышленные отходы являются неизбежным результатом каждого производства и серьезной угрозой для окружающей среды, и ежегодно в мире они составляют несколько миллиардов тонн. В то время как отходы одного производства являются ценным сырьем для другого, вторичная переработка не только безвредна для природы, но и является дополнительным источником дохода и богатства.

Одним из таких производств в Таджикистане является завод «Таджик Алюминий», отходы которого выводят из строя полезные площади и загрязняют окружающую среду. При этом, они содержат необходимые компоненты, такие как сульфаты, карбонаты, гидрокарбонаты и фториды натрия, калия, кальция и алюминия, и пригодны для вторичной переработки. Поэтому изучение пятикомпонентной системы Na^+ , Ca^{2+} , $\text{Al}^{3+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, HCO_3^- - H_2O при температурах 273 и 298 К является актуальным и определяет закономерности фазообразования, происходящие в ней и оптимальные условия переработки сырья и жидких отходов алюминиевой промышленности, состоящих из солей, особенно вышеупомянутых компонентов.

Результаты исследования диссертационной работы имеют не только научно-теоретическую, но и практическую ценность. Ее результаты необходимы для разработки оптимальных технологий переработки природного и технического сырья, содержащего сульфаты, карбонаты, гидрокарбонаты, фториды натрия, кальция и алюминия, включая жидкие отходы алюминиевой промышленности.

Степень изученности научной темы. Основы физико-химического анализа, особенно анализ и исследование химических систем, были разработаны рядом ученых, в том числе Н.С. Курнаковым, В.Н. Лодочниковым, В.П. Радышевым, В.Я. Аносовым, Д.С. Коржинским, Ф.М. Перельманом, В.А. Жариковым, В.И. Михеевой, Я.Г. Горошенко, А.С. Труниным, Л.С. Солиевым и другими.

Вышеупомянутые ученые проводили свои научные исследования в металлических, оксидных, солевых химических системах в зависимости от температуры плавления. Изучение фазовых равновесий и растворимости в водно-солевых химических системах было начато Горошенко Я.Г. и Солиевым Л. Ими были определены фазовые равновесия и растворимость в многокомпонентной водно-солевой системе Na , K , Mg , $\text{Ca} \parallel \text{SO}_4$, Cl - H_2O для температурного интервала 0-100 °С на пятикомпонентном уровне и границы отдельных областей кристаллизации на шестикомпонентном уровне, построены фазовые диаграммы и диаграммы растворимости и проведена фрагментация отдельных фаз. Однако, при анализе литературы выяснилось, что пятикомпонентная система Na^+ , Ca^{2+} , $\text{Al}^{3+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, HCO_3^- - H_2O вообще не изучена, а её подсистемы в основном изучены на трехкомпонентном

уровне, из 9 систем 4: $\text{Na}^+||\text{SO}_4^{2-}$, $\text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$; $\text{Ca}^{2+} ||\text{SO}_4^{2-}$, $\text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$; Na^+ , $\text{Ca}^{2+}||\text{SO}_4^{2-} - \text{H}_2\text{O}$ и Na^+ , $\text{Ca}^{2+}||\text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$ изучены частично.

Связь исследования с программами (проектами) или научными темами.

Диссертационная работа выполнена в соответствии с задачами четвертой национальной стратегической цели, связанной с развитием химической промышленности на основе местного сырья, в частности, «Национальной стратегии развития Таджикистана на период до 2030 года» и по плану научно-исследовательского проекта «Растворимость и кристаллизация солей в многокомпонентной системе, образованной сульфатами, карбонатами, гидрокарбонатами, фторидами натрия, калия и кальция», номер государственной регистрации (№ ГР): 0119 TJ 00957).

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Основной целью данной работы является определение фазообразования и растворимости в многокомпонентной водно-солевой обменной системе, состоящей из катионов натрия, кальция, алюминия и анионов сульфата, гидрокарбоната при температурах 273 и 298 К и изучение концентрационных параметров фаз в геометрических формах полей, линий и точек.

Для достижения поставленной диссертантом цели были предусмотрены следующие задачи:

- изучение состояния исследуемой 5-компонентной системы и образующих ее 3-х и 4-компонентных подсистем с исследованием фазообразования и построением их итоговой диаграммы;
- определение на основе данных фазовых равновесий 3-х и 4-компонентных систем и фазообразования в подсистемах состава 5-компонентной системы с использованием метода трансляции для установления геометрических форм в изотермах 273 и 298 К с построением диаграмм фазового комплекса;
- по полям кристаллизации отдельных фаз для 4-х компонентных систем построить диаграммы и исследовать их, для 5-компонентной системы изучить совместную кристаллизацию двух фаз и их фрагментацию;
- изучение и анализ экспериментальных результатов растворимости исследуемых 4-х компонентных систем и построение диаграмм их состояния в изотермах 273 и 298 К;
- на основе диаграмм фазового равновесия и состояния подсистем изучаемой многокомпонентной системы разработать принципиальную технологическую схему разделения отдельных твердых фаз.

Объектом научного исследования является многокомпонентная система Na^+ , Ca^{2+} , $\text{Al}^{3+}||\text{SO}_4^{2-}$, $\text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$, четырехкомпонентные подсистемы Na^+ , Ca^{2+} , $\text{Al}^{3+} - \text{SO}_4^{2-} - \text{H}_2\text{O}$; Na^+ , Ca^{2+} , $\text{Al}^{3+} - \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$; Ca^{2+} , $\text{Al}^{3+}||\text{SO}_4^{2-}$, $\text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$; Na^+ , $\text{Al}^{3+}||\text{SO}_4^{2-}$, $\text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$; Na^+ , $\text{Ca}^{2+}||\text{SO}_4^{2-}$, $\text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$ и 9 других трехкомпонентных систем.

Предметом научного исследования диссертационной работы является растворимость и фазовые равновесия системы второго порядка, состоящей из ионов натрия, кальция, алюминия, сульфата, бикарбоната и воды при температурах 273 и 298 К.

Научная новизна выполненной докторской (PhD) диссертации заключается в следующем:

- комплексное изучение состояния целевой системы, компонентность которой равна 5-и, 4-х и 3-х компонентным её подсистемам, результатом чего стало построение диаграмм фазовых равновесий;
- определение фазообразования в многокомпонентных системах и подсистемах стало новым результатом. На основе анализа фазовых равновесий в подсистемах с применением метода трансляции **впервые** установлено количество геометрических конфигураций фаз;

- в системах, компонентность которых равна 4, на базе построенных диаграмм были изучены процессы дробления зон кристаллизации отдельных фаз, а также в системах с числом компонентов 5 исследованы области одновременного выделения двух фаз;

- впервые экспериментально исследована растворимость в четырехкомпонентных системах $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+}, \text{Al}^{3+}-\text{SO}_4^{2-}-\text{H}_2\text{O}$, $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+}||\text{SO}_4^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$ при температурах 273 и 298 К, и построены соответствующие диаграммы состояния (растворимости). Впервые, исходя из анализа диаграмм состояния подсистем исследуемой химической системы, предложена принципиальная технологическая схема для извлечения отдельных твердых фаз из жидких промышленных отходов алюминиевого производства.

Теоретическая и научно-практическая значимость исследования заключается в следующем:

- определенные с помощью метода трансляции оптимальные параметры фазообразования в геометрических формах могут быть использованы в качестве справочного материала для специалистов;

- выявленные закономерности фазовых превращений (фазовый комплекс) могут служить научной основой для создания эффективных методов переработки природного и техногенного сырья, содержащего ценные соединения натрия, кальция и алюминия (сульфаты, карбонаты, гидрокарбонаты).

Основные защищаемые положения диссертационного исследования:

- обзор современного уровня исследований пятикомпонентной химической системы $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+}, \text{Al}^{3+}||\text{SO}_4^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$ и ее составных частей (четырёх- и трехкомпонентных систем) в температурном диапазоне 273-298 К;

- результаты экспериментального определения фазообразования в четырехкомпонентных системах $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+}, \text{Al}^{3+}-\text{SO}_4^{2-}-\text{H}_2\text{O}$; $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+}, \text{Al}^{3+}-\text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$; $\text{Ca}^{2+}, \text{Al}^{3+}||\text{SO}_4^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$; $\text{Na}^+, ; \text{Na}^+, \text{Ca}^{2+}||\text{SO}_4^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$; $\text{Al}^{3+}||\text{SO}_4^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$ используя метод трансляции при изотермах 273 и 298 К, а также предоставление полученных данных в виде графических диаграмм;

- кроме определения структуры соответствующих диаграмм при температурах 273 и 298 К, также в системе второго порядка $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+}, \text{Al}^{3+}||\text{SO}_4^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$ с использованием метода трансляции изучены фазовые равновесия;

- изучение системы второго порядка позволило описать структуру её диаграммы состояния, а также в невариантных точках таких подсистем как: $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+}||\text{SO}_4^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$ и $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+}, \text{Al}^{3+}-\text{SO}_4^{2-}-\text{H}_2\text{O}$ определено функционирование растворимости.

Достоверность результатов исследования. Достоверность полученных научных результатов доказывается и обосновывается современными методами физико-химического анализа, их апробацией на форумах, симпозиумах, конференциях Международного и Республиканского уровней и публикацией материалов в профильных научных журналах.

Соответствие диссертации доктору (PhD) паспорту научной специальности 6D.060601 – неорганическая химия.

Полученные нами результаты научного исследования неорганических веществ соответствуют общим требованиям паспорта научной специальности 6D.060601 – неорганическая химия. В частности, в ходе исследования было установлено, что определены основные свойства этих веществ, включая их поведение с другими веществами в различных условиях. Это отражает взаимосвязь состава, строения и свойств этих взаимодействующих веществ, что отражено в отдельных пунктах паспорта специальности.

Личный вклад автора. Личный вклад автора заключается в анализе существующей литературы, планировании и проведении теоретических и

экспериментальных исследований, обработке, обобщении и анализе полученных результатов, подготовке выводов, а также подготовке и публикации научных статей.

Апробация и внедрение результатов диссертации доктора (PhD).

Основные и наиболее важные результаты выполненной научной работы были представлены на ежегодных научно-теоретических конференциях профессорско-преподавательского состава Таджикского государственного педагогического университета им. С. Айни (Душанбе, 2019-2025); Международной конференции «Экологобезопасные и ресурсосберегающие технологии и материалы» (Улан-Удэ, 2020); Международной конференции «Современные проблемы металлургической промышленности» (Душанбе, 2021); симпозиуме молодых ученых «Физико-химические методы в междисциплинарных экологических исследованиях» (Москва, 2021); «IV Байкальском материаловедческом форуме» (Улан-Удэ, 2022); Международной конференции «Развитие новых направлений в химии и химической технологии» (Душанбе, 2023); Всемирном форуме «Физико-химические методы в междисциплинарных экологических исследованиях» (Москва, 2023); «Современное состояние и перспективы физико-химического анализа» (Душанбе, 2023); XIX Нумановских чтениях «Развитие фундаментальной и прикладной химии и ее вклад в индустриализацию страны» (Душанбе, 2024); Международной конференции «Химическая наука и образование, проблемы и перспективы развития» (Махачкала, 2024); «XXII Менделеевском съезде по общей и прикладной химии» (Сириус, 2024); «Вопросы физической и координационной химии» (Душанбе, 2024); «Современное состояние и перспективы физико-химического анализа» (Душанбе, 2025); IX Булатовских чтениях» (Красноярск, 2025); «V Байкальском форуме по материаловедению» (Улан-Удэ, 2025) были обсуждены и прошли апробацию.

Публикации по теме докторской диссертации (PhD). По результатам диссертационного исследования опубликовано 26 научных работ, из них 2 – малых патента на изобретение, 10 – статей в журналах, рекомендованных ВАК при Президенте Республики Таджикистан и ВАК РФ (1 – Scopus). Остальные 14 материалов опубликованы в виде тезисов докладов на симпозиумах, форумах и конференциях различного Международного и Республиканского уровней.

Объем и структура докторской (PhD) диссертации. Диссертация представляет собой рукопись, выполненную на 147 страницах компьютерного набора и состоящую из введения, 3 глав и выводов, а также содержит 42 рисунков и 36 таблицы, 131 наименование цитируемой литературы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Вводная часть работы посвящена обоснованию актуальности и значимости предпринятого исследования. Здесь формулируются цель и задачи диссертации, а также раскрывается ее научная, теоретическая и практическая ценности.

Первая глава диссертации посвящена краткому обзору научной литературы, рассматривающей методы исследования химических систем, с особым вниманием к многокомпонентным системам.

Во второй главе представлены и интерпретированы результаты изучения изотермы фазообразования и изотермы растворимости системы второго порядка. Такая система при температуре 273 К состоит из катионов Na^+ , Ca^{2+} , Al^{3+} , анионов SO_4^{2-} , HCO_3^- и составляющих ее подсистем. Они иллюстрируются такими диаграммами как: фазовый комплекс и растворимость.

Третья глава диссертационной работы посвящена данным по растворимости и фазообразованию системы второго порядка. Система состоит из катионов Na^+ , Ca^{2+} , Al^{3+} , анионов SO_4^{2-} , HCO_3^- и составляющих ее трех- и четырехкомпонентных подсистем при температуре 298 К. На основе этих результатов построены диаграммы совместного фазообразования и состояния.

Данная диссертационная работа завершается основными выводами, предложенными рекомендациями по практическому применению полученных автором данных, а также приложением и списком цитированной литературы.

В работе приняты следующие сокращения и обозначения: Gr – гипс ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$); Mib – мирабилит ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$); Nh – нахколит (NaHCO_3); Al·18 – октадекагидрат сульфата алюминия ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$); AlH – гидрокарбонат алюминия ($\text{Al}(\text{HCO}_3)_3$); CaH – гидрокарбонат кальция ($\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$); Na·Al·12 – додекагидрат сульфатов натрия-алюминия $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot \text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$; Gb – глауберит $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot \text{CaSO}_4$; МКС – многокомпонентные системы; ПКС – пятикатионные обменные системы; ЧКС – четырехкатионные обменные системы; ТКС – трехкомпонентные системы; ОФХА – основы физико-химического анализа; ЕФБ – единый фазовый блок; ИКС – исходные компоненты смесей.

Многокомпонентные системы и методы их изучения

Для создания и совершенствования промышленных способов обработки природных и искусственных материалов ключевым теоретическим фундаментом является глубокое осмысление закономерностей формирования фаз в химических системах. Физико-химическое исследование является основным подходом к изучению указанных систем. Они позволяют определить характеристики взаимовлияния и взаимодействия составляющих систему компонентов в различных агрегатных состояниях. В итоге исследований создаются диаграммы растворимости, плавления и фазовые диаграммы, дающие информацию об условиях фазового баланса.

С возрастанием количества компонентов в системах, содержащих более трех веществ, количество потенциальных подсистем возрастает практически по экспоненте. Это влечет за собой существенный рост объема экспериментальных данных (включая растворимость и температуру плавления), которые необходимо получить для полного структурного анализа традиционными подходами. Приведенные расчеты демонстрируют, что для шестикомпонентной системы экспериментальное исследование становится практически невыполнимой задачей ввиду чрезвычайно большого числа требуемых экспериментальных точек.

Химические системы, особенно водно-солевые, исследуются различными способами, среди которых выделяются визуально-политермический, Схрейнемакерса, метод сечений и графоаналитический методы. В докторской диссертации пятикомпонентная система Na^+ , Ca^{2+} , $\text{Al}^{3+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, $\text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$ была проанализирована с применением разработанного Л. Солиевым метода трансляции. Этот метод был успешно использован при исследовании достаточно сложных многокомпонентных химических равновесий. Например, для изучения шестикомпонентной системы второго порядка: Na , K , Mg , $\text{Ca} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, $\text{Cl}^- - \text{H}_2\text{O}$. Система включала ранее исследованные пятикомпонентные подсистемы. Для ряда других пятикомпонентных систем второго порядка, например, K , Ca , $\text{Mg} \parallel \text{SO}_4$, $\text{Cl}^- - \text{H}_2\text{O}$, метод трансляции также оказался эффективным.

Таблица 1 содержит информацию о степени изученности пятикомпонентной системы, образованной ионами Na^+ , Ca^{2+} , Al^{3+} , SO_4^{2-} , HCO_3^- и водой, и её подсистем при температурах 273 и 298 К. В ходе исследования этой системы было установлено существование пяти четырехкомпонентных подсистем (две с общим ионом и три обменных), а также девяти трехкомпонентных подсистем, некоторые из которых являются частью четырехкомпонентных.

Таблица 1 – Данные о степени изученности пятикомпонентной системы Na^+ , Ca^{2+} , $\text{Al}^{3+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, $\text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$, а также её подсистем при температурах 273 и 298 К.

№, п/п	Система	Компонентность	Изотерма, К	
			273	298
1.	Na^+ , Ca^{2+} , $\text{Al}^{3+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, $\text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$	5	-	-
2.	Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, $\text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$	4	-	-

3.	$\text{Na}^+, \text{Al}^{3+} \parallel \text{SO}_4^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$	4	-	-
4.	$\text{Ca}^{2+}, \text{Al}^{3+} \parallel \text{SO}_4^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$	4	-	-
5.	$\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+}, \text{Al}^{3+} \parallel \text{SO}_4^{2-} - \text{H}_2\text{O}$	4	-	-
6.	$\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+}, \text{Al}^{3+} \parallel \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$	4	-	-
7.	$\text{Na}^+ \parallel \text{SO}_4^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$	3	+	+
8.	$\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+} \parallel \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$	3	+	+
9.	$\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$	3	+	+
10.	$\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-} - \text{H}_2\text{O}$	3	+	+
11.	$\text{Na}^+, \text{Al}^{3+} \parallel \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$	3	-	-
12.	$\text{Al}^{3+} \parallel \text{SO}_4^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$	3	-	-
13.	$\text{Na}^+, \text{Al}^{3+} \parallel \text{SO}_4^{2-} - \text{H}_2\text{O}$	3	-	-
14.	$\text{Ca}^{2+}, \text{Al}^{3+} \parallel \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$	3	-	-
15.	$\text{Ca}^{2+}, \text{Al}^{3+} \parallel \text{SO}_4^{2-} - \text{H}_2\text{O}$	3	-	-

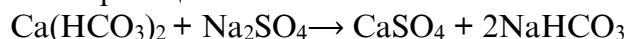
Как следует из таблицы 1, пятикатионная система $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+}, \text{Al}^{3+} \parallel \text{SO}_4^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$ и четырехкатионные системы: $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$; $\text{Na}^+, \text{Al}^{3+} \parallel \text{SO}_4^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$; $\text{Ca}^{2+}, \text{Al}^{3+} \parallel \text{SO}_4^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$; $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+}, \text{Al}^{3+} \parallel \text{SO}_4^{2-} - \text{H}_2\text{O}$ и $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+}, \text{Al}^{3+} \parallel \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$ в целом не изучены, их фазовые диаграммы и состояния не построены.

Из 9 трехкомпонентных систем такого состава хорошо изучены только следующие системы при температурах 273 и 298 К: $\text{Na}^+ \parallel \text{SO}_4^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$; $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+} \parallel \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$; $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$ и $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-} - \text{H}_2\text{O}$. Оставшиеся 5 трехкомпонентных систем: $\text{Na}^+, \text{Al}^{3+} \parallel \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$; $\text{Al}^{3+} \parallel \text{SO}_4^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$; $\text{Na}^+, \text{Al}^{3+} \parallel \text{SO}_4^{2-} - \text{H}_2\text{O}$; $\text{Ca}^{2+}, \text{Al}^{3+} \parallel \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$ и $\text{Ca}^{2+}, \text{Al}^{3+} \parallel \text{SO}_4^{2-} - \text{H}_2\text{O}$ в целом не исследованы и являются объектом нашего исследования.

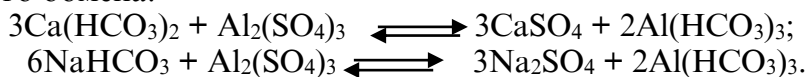
Фазовые равновесия в геометрических формах пятикомпонентной водно-солевой системы $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+}, \text{Al}^{3+} \parallel \text{SO}_4^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$ при 273 К

Исследуемая система состоит из воды и двух веществ, образующих обменные реакции, а также одного дополнительного вещества, имеющего общий ион с одним из этих двух. Такие системы можно представить следующими формулами: $\text{A}^+, \text{B}^+, \text{C}^{+//} \text{X}^-, \text{Y}^- - \text{H}_2\text{O}$ или $\text{A}^+, \text{B}^+ // \text{X}^-, \text{Y}^-, \text{Z}^- - \text{H}_2\text{O}$. Эти формулы показывают, что в системе присутствуют катионы А, В, С и анионы Х и Y.

Объектом нашего научного исследования является пятикомпонентная обменная система $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+}, \text{Al}^{3+} \parallel \text{SO}_4^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$, где в качестве катионов А, В и С выступают $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+}$ и Al^{3+} , а в качестве анионов Х и Y – SO_4^{2-} и HCO_3^- . Данная система состоит из пары солей - гидрокарбоната натрия (NaHCO_3) с сульфатом кальция (CaSO_4) и сульфата натрия (Na_2SO_4) с гидрокарбонатом кальция ($\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$). Они способны к обменным реакциям. Между этими парами имеет место следующая обменная реакция:



Система, кроме указанных соединений, содержит сульфат алюминия ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) и воду. Присутствие $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ делает вероятным протекание других реакций ионного обмена:



Важно отметить, что уравнения протекающих реакций не являются полностью независимыми. К примеру, уравнение взаимодействия NaHCO_3 с $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ можно вывести, преобразовав уравнение реакции Na_2SO_4 с $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ (перенеся левую часть вправо и наоборот) и затем сложив его с уравнением реакции $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ с $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$.

В итоге, система, содержащая семь компонентов (Na_2SO_4 , $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$, NaHCO_3 , CaSO_4 , $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, $\text{Al}(\text{HCO}_3)_3$ и H_2O (рисунок 1), характеризуется двумя независимыми

химическими превращениями, что указывает на наличие пяти независимых компонентов.

Таким образом, данная система представляет собой пятикомпонентную взаимную систему с водным растворителем. Исключение воды приводит к четырехкомпонентной обменной системе, известной как четырехкомпонентная расплавленная обменная система.

Треугольная призма служит визуальным представлением этой системы. Основанием призмы выступает равносторонний треугольник, а ее боковые поверхности состоят из четырехугольников (рис. 1).

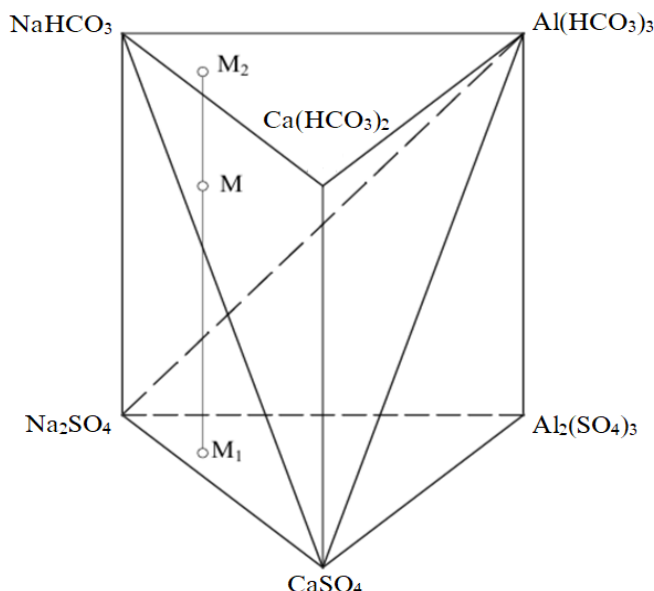


Рисунок 1 – Структура расположения точек в водной системе, включающей ионы натрия, кальция, алюминия, сульфата, гидрокарбоната и воду.

Рассмотрим призму, все ребра которой имеют одинаковую длину, принимаемую за 100 условных единиц. Количество катионов, размещаемых на основаниях данной призмы, соответствует принципам построения диаграмм трехкомпонентных систем методом Розебома. В результате определяются две точки, обозначаемые как M_1 и M_2 . Соединение двух точек осуществляется посредством прямолинейного отрезка. Данный отрезок M_1M_2 , который идет параллельно одному из боковых ребер призмы и обладает протяженностью в 100 условных единиц, разбивается точкой M на два сегмента: M_1M , величина которой равна y , и M_2M , величина которой составляет x .

Вершины призмы наглядно представляют собой индивидуальные соли, входящие в состав рассматриваемой системы. Если двойные соли и кристаллогидраты отсутствуют, а твердые фазы представлены шестью солями (Na_2SO_4 , $Ca(HCO_3)_2$, $NaHCO_3$, $CaSO_4$, $Al_2(SO_4)_3$, $Al(HCO_3)_3$), то вся призма делится на шесть зон кристаллизации. Каждая зона отвечает за выпадение в осадок одной из этих солей (рис. 2). Границы между этими зонами указывают на условия, при которых одновременно кристаллизуются две соли. Линии пересечения этих поверхностей, называемые предельными, обозначают составы растворов, из которых совместно осаждаются три соли.

В заключение, точки E_1 , E_2 и E_3 соответствуют растворам солей, в которых одновременно кристаллизуются четыре соли: в E_1 – соли Na_2SO_4 , $CaSO_4$, $Al_2(SO_4)_3$, $Al(HCO_3)_3$; в E_2 – $CaSO_4$, $NaHCO_3$, $Al(HCO_3)_3$, Na_2SO_4 и в E_3 – четыре соли $CaSO_4$, $NaHCO_3$, $Ca(HCO_3)_2$, $Al(HCO_3)_3$. Эти точки являются четверными эвтониками для безрастворимых систем и солевые проекции как инструмент для изучения четверных эвтонических растворных систем.

Исходно призматическая диаграмма делилась на три нерегулярных тетраэдра с помощью плоских сечений. В частности, диагональное сечение, образованное

вершинами $\text{Na}_2\text{SO}_4 - \text{CaSO}_4 - \text{Al}(\text{HCO}_3)_3$, выделило тетраэдр, включающий $\text{Al}(\text{HCO}_3)_3 - \text{Na}_2\text{SO}_4 - \text{CaSO}_4$. Последующее диагональное сечение, проведенное через вершины $\text{NaHCO}_3 - \text{CaSO}_4 - \text{Al}(\text{HCO}_3)_3$ в оставшейся части призмы, сформировало два дополнительных нерегулярных тетраэдра: $\text{Na}_2\text{SO}_4 - \text{NaHCO}_3 - \text{Al}(\text{HCO}_3)_3 - \text{CaSO}_4$ и $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2 - \text{NaHCO}_3 - \text{CaSO}_4 - \text{Al}(\text{HCO}_3)_3$.

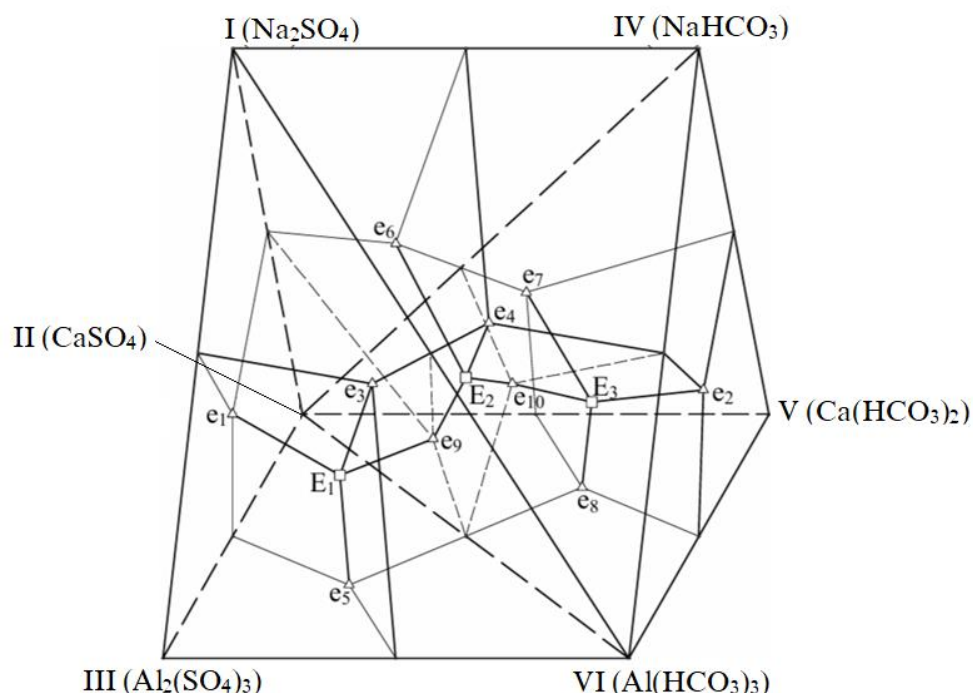


Рисунок 2 – Схема фазообразования пятикомпонентной системы $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+}, \text{Al}^{3+} \parallel \text{SO}_4^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$ при изотерме 273 К

Исходя из этого, следует, что состав рассматриваемой системы, представляющий собой солевую массу, всегда может быть декомпозирован на четыре компонентные соли. Определение конкретного набора из четырех солей обусловлено принадлежностью фигуративной точки к одному из трех ранее обозначенных тетраэдрических объемов. Визуализация разделения призматической диаграммы (рис.2) посредством двух диагональных сечений I-II-VI и II-IV-VI приведена на рисунке 3.

Для получения плоского изображения данной диаграммы возможно применение ортогонального проецирования основания и боковой грани призмы.

В некоторых ситуациях для визуализации фрагментов призматической диаграммы используется метод перспективной проекции. Его центр находится в одной из вершин призмы. Рассмотрим граничные поверхности области кристаллизации $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ в качестве примера (рис. 3 справа). Они спроецированы из вершины V на плоскость, которая проходит через точки II, IV и VI. Образуется плоская диаграмма. Она расположена в равнобедренном треугольнике VI-II-IV.

Можно получить двумерное представление этой диаграммы. Для этого необходимо использовать ортогональные проекции основания и одну из боковых граней призмы. Иногда для визуализации элементов призматической диаграммы применяют перспективное проектирование. Тогда центр проекции совпадает с одной из вершин призмы. Например, поверхности, ограничивающие область кристаллизации $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ (рис. 3 справа), можно спроецировать из вершины V на плоскость, которая определяется точками II, IV и VI. Итог - плоская диаграмма, размещённая внутри равнобедренного треугольника VI-II-IV.

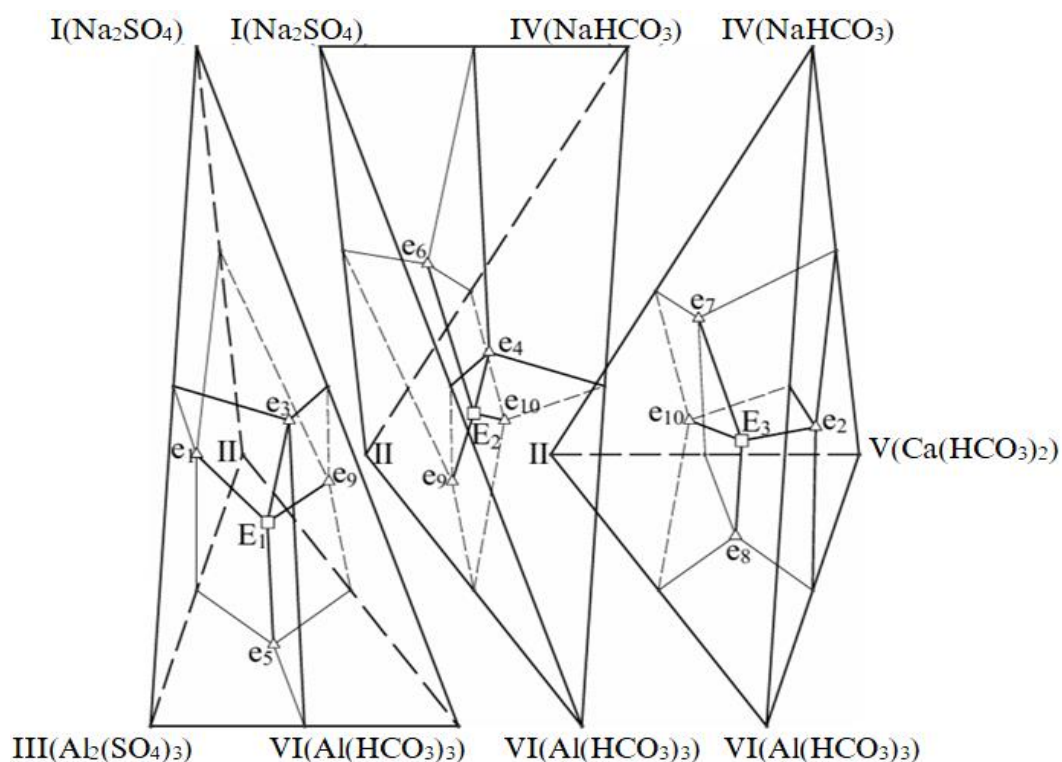


Рисунок 3 – Триангуляция проекции солевой изотермы фазообразования системы $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+}, \text{Al}^{3+} \parallel \text{SO}_4^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$ с двумя устойчивыми диагональными сечениями.

Согласно полученным нами данным с помощью метода трансляции, в четырехкомпонентной системе $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+}, \text{Al}^{3+} \parallel \text{SO}_4^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$ на уровне неинвариантных точек характерны следующие твердые фазы, находящиеся в равновесии (табл. 2).

Таблица 2 – Неинвариантные точки для четырехкомпонентной системы, включающей ионы $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+}, \text{Al}^{3+} \parallel \text{SO}_4^{2-}, \text{HCO}_3^-$ в водной среде при температуре 273 К.

Неинвариантные точки	Система	Равновесные твёрдые фазы
E_1^4	$\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+}, \text{Al}^{3+} \parallel \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$	Nh + CaH + AlH
E_2^4	$\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+}, \text{Al}^{3+} \parallel \text{SO}_4^{2-} - \text{H}_2\text{O}$	Mib + Gp + Al·18
E_3^4 E_4^4	$\text{Ca}^{2+}, \text{Al}^{3+} \parallel \text{SO}_4^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$	Gp + CaH + AlH Gp + AlH + Al·18
E_5^4 E_6^4	$\text{Na}^+, \text{Al}^{3+} \parallel \text{SO}_4^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$	Nh + AlH + Al·18 Mib + Nh + Al·18
E_7^4 E_8^4	$\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$	Mib + Nh + Gp Nh + CaH + Gp

Визуализация диаграмм состояния представляет собой одну из ключевых задач при анализе многокомпонентных систем. Несмотря на распространенное использование призматических диаграмм, данный подход позволяет отображать лишь солевой состав пятикомпонентных систем (рис. 2). Комбинирование нескольких таких диаграмм приводит к существенному усложнению их интерпретации. Идея «Развёрнутой призмы», предложенная Л. Солиевым для лучшего представления фазовых равновесий в многокомпонентных обменных системах, применена нами при изучении пятикомпонентной системы $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+}, \text{Al}^{3+} \parallel \text{SO}_4^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$ (рис. 4).

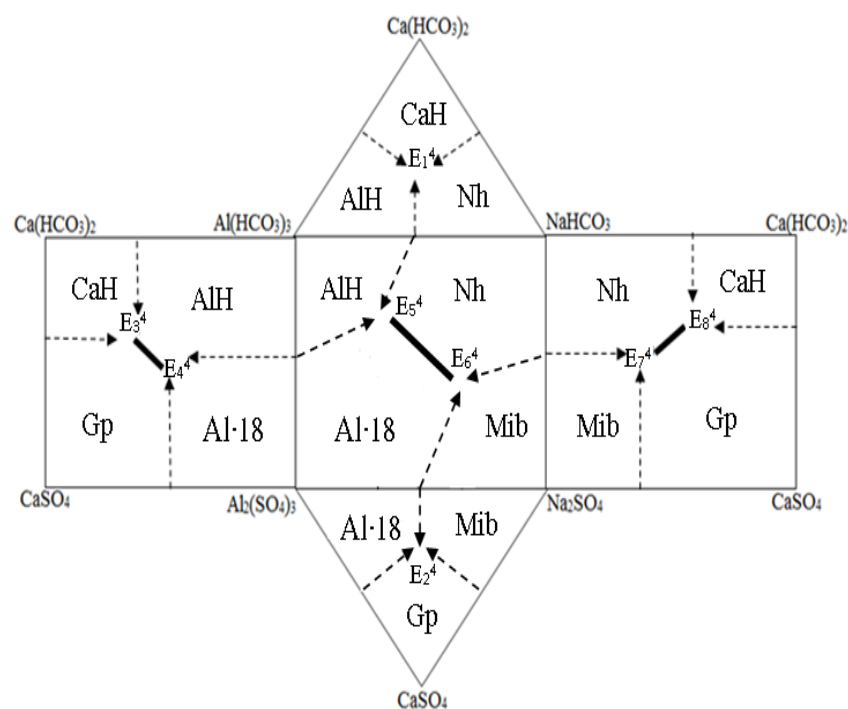


Рисунок 4 – «Развернутая призма» -наглядный инструмент для анализа фазовых превращений и определения областей кристаллизации различных минеральных фаз в исследуемой водно-солевой системе второго порядка при 273 К на уровне 4-хкомпонентной системы.

С целью дополнительного упрощения представленной диаграммы, в частности, для объединения областей, соответствующих кристаллизации отдельных твердых фаз, возможно ее изображение в виде схемы, пример которой приведен на рисунке 5.

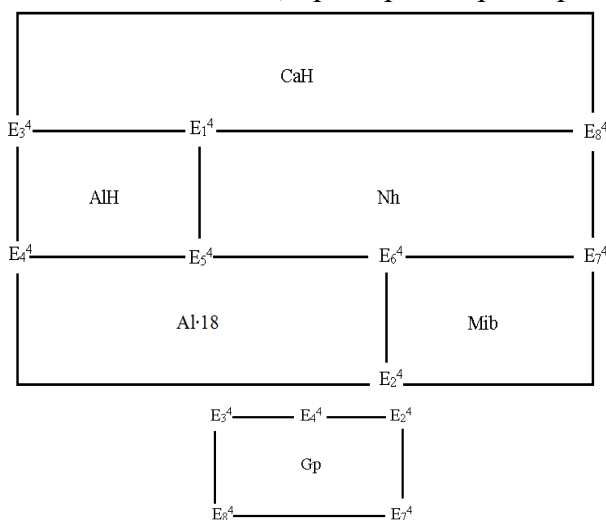


Рисунок 5 – Схематическая четырехуровневая диаграмма фазового превращения в системе второго порядка (ионы натрия, кальция, алюминия, гидрокарбоната, сульфата и вода) при 273 К

При использовании метода трансляции, когда добавляется пятый компонент к любой из четырехкомпонентных систем, геометрические элементы последней увеличивают свой размер на единицу и на следующем уровне компонентности трансформируются и транслируются, образуя в пространстве пятикомпонентного уровня следующие невариантные точки:

$$E_1^4 + E_8^4 + E_3^4 \text{ -----} \rightarrow E_1^5 = \text{AlH} + \text{CaH} + \text{Nh} + \text{Gp};$$

$$E_2^4 + E_6^4 + E_7^4 \text{ -----} \rightarrow E_2^5 = \text{Al}\cdot 18 + \text{Gp} + \text{Mib} + \text{Nh};$$

$$E_4^4 + E_5^4 \text{ -----} \rightarrow E_3^5 = \text{Gp} + \text{Al}\cdot 18 + \text{AlH} + \text{Nh}.$$

Рисунок 6 содержит диаграмму, отражающую условия образования фаз в системе $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+}, \text{Al}^{3+} \parallel \text{SO}_4^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$ при 273 К, для четырех-пятикомпонентного состава, с обозначением всех установленных невариантных равновесий.

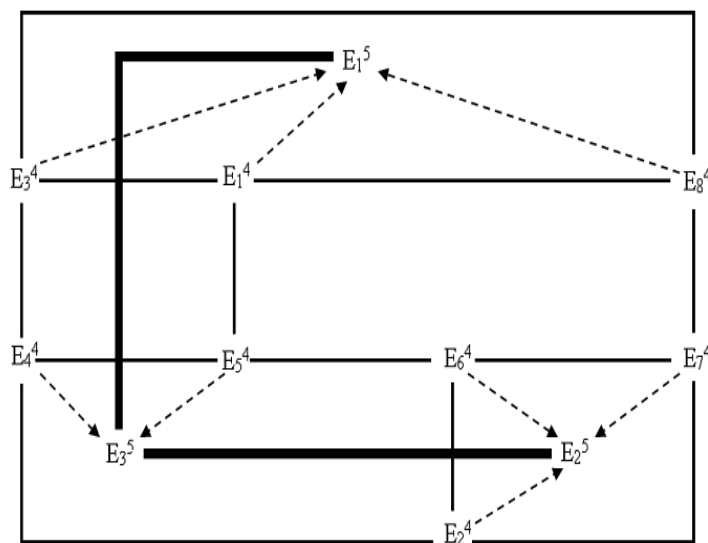


Рисунок 6 – Система $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+}, \text{Al}^{3+} \parallel \text{SO}_4^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$ при 273 К.

Диаграмма отражения условий образования фаз четырех-пятикомпонентного состава. Изучена структура диаграммы (рис. 6). Установлено, что она является пятикамерной и содержит 3 невариантные точки и 10 моновариантных линий. Нонвариантные точки имеют определенный состав равновесных твердых фаз.

Восемь моновариантных линий генерированы посредством трансляции невариантных точек, принадлежащих четырехкомпонентному уровню, и визуализированы пунктирными линиями с векторными указателями направления трансляции.

Фрагментация диаграммы фазообразования, осуществленная с применением метода трансляции, обеспечивает возможность аналитического исследования и прогнозирования путей кристаллизации солевых компонентов в сложных поликомпонентных системах на основе данных о составе твердых фаз, выделяющихся на начальном и конечном этапах процесса.

Растворимость в невариантных точках системы $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+}, \text{Al}^{3+} \parallel \text{SO}_4^{2-} - \text{H}_2\text{O}$ при температуре 273 К.

Состояние невариантной точки, полученной методом трансляции, было экспериментально изучено с целью определения растворимости. Проведено экспериментальное исследование, направленное на определение характеристик невариантной точки, полученной с использованием метода трансляции. Оно осуществлялось с использованием ряда методологических подходов, одним из применяемых методов являлся метод титрования.

В целях экспериментальной верификации данных о фазообразовании в невариантных точках исследуемой системы, полученных методом трансляции, было проведено исследование растворимости в ряде четырехкомпонентных систем. Среди изученных систем были система с общим ионом $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+}, \text{Al}^{3+} \parallel \text{SO}_4^{2-} - \text{H}_2\text{O}$ (при температуре 273 К) и обменная система $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$ (при температурах 273 и 298 К).

Впоследствии, с использованием ортогональных и перспективных проекций, которые полностью отличаются от предыдущих работ специалистов, была построена диаграмма фазовых комплексов на основе солевого тетраэдра. На ортогональной

проекция фазовой диаграммы отчетливо видны следующие элементы: точки e_1 , e_2 , e_3 обозначающие проекции составов насыщенных растворов, соответствующих компонентам Na_2SO_4 , CaSO_4 , $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$. Линии $E_1^3-E_1^4$, $E_2^3-E_1^4$, $E_3^3-E_1^4$ представляют собой проекции моновариантных равновесий, в которых сосуществуют две фазы: Mb + Gr, Gr + Al·18 и Mb + Al·18, соответственно. Области $e_1-E_1^3-E_1^4-E_3^3-e_1$, $e_2-E_1^3-E_1^4-E_2^3-e_2$ и $e_3-E_3^3-E_1^4-E_2^3-e_3$ соответствуют областям дивариантной кристаллизации фаз Mb, Gr и Al·18, соответственно. Точка E_1^4 – это инвариантная точка, отражающая состав раствора, в котором находятся в равновесии все три фазы: Mb, Gr и Al·18.

Как было отмечено, из жидких промышленных отходов производства алюминия разработана принципиальная технологическая схема кристаллизации химических веществ. Для этого использованы диаграммы комплексных фазовых равновесий системы Ca^{2+} , Na^+ , $\text{Al}^{3+} \parallel \text{SO}_4^{2-} - \text{H}_2\text{O}$, построенные с помощью универсального метода трансляции, разработана для линий, областей и точек (рис.7). В соответствии с ней показано, что в дивариантных областях находится одна фаза, на моновариантных линиях - две, а в нонвариантных точках - три фазы в равновесии. При обработке в указанных формах вещества образуются поэтапно, в соответствии с их растворимостью и количеством, присутствующим в составе жидких промышленных отходов.

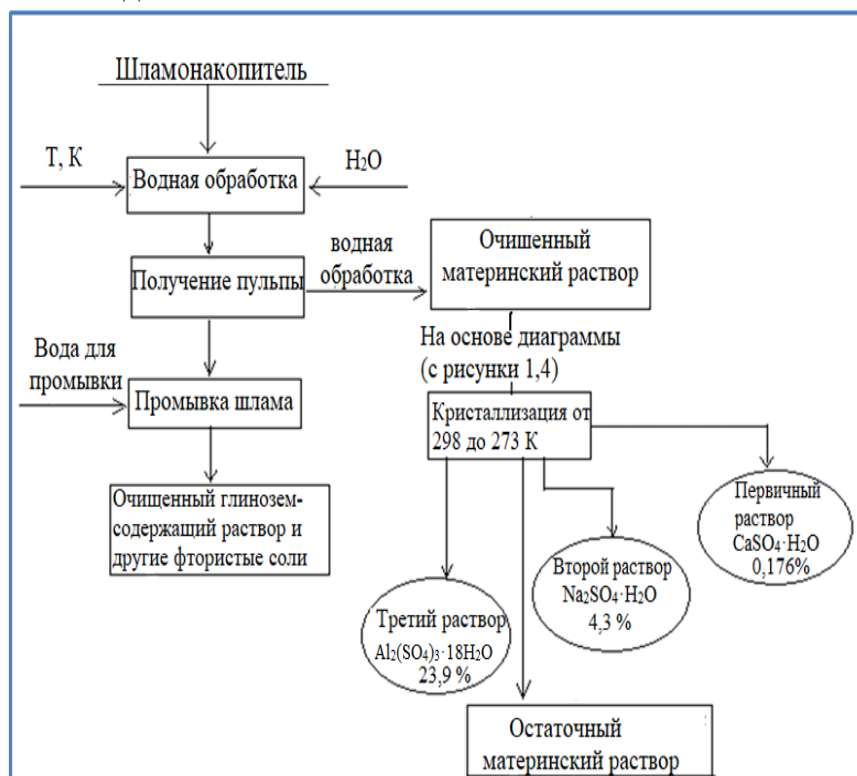


Рисунок 7 – Принципиальная схема технологии процесса кристаллизации отдельных твердых фаз в системе Na^+ , Ca^{2+} , $\text{Al}^{3+} \parallel \text{SO}_4^{2-} - \text{H}_2\text{O}$

На поверхности насыщенных растворов процесс кристаллизации обычно упорядочивается так. Направления роста кристаллов лежат в плоскостях, которые задаются составом раствора и одной из трех сторон тетраэдра, которыми являются водный раствор сульфата кальция, водный раствор сульфата натрия или водный раствор сульфата алюминия. На диаграмме фазового состояния эти кристаллизационные пути выглядят как моновариантные прямые. Представленная диаграмма фазообразования демонстрирует, каким образом может изменяться солевой состав насыщенных растворов в процессе изотермического упаривания. Это ключевое свойство центральной проекции.

Низкая растворимость сульфата кальция по сравнению с другими компонентами в системе Na^+ , Ca^{2+} , $\text{Al}^{3+} \parallel \text{SO}_4^{2-} - \text{H}_2\text{O}$, сначала приводит к полю

кристаллизации CaSO_4 ($\text{CaSO}_4\text{E}_1^3\text{E}_1^4\text{E}_2^3\text{CaSO}_4$). То есть, сначала образуется поле кристаллизации CaSO_4 и выделяется чистый гипс. При этом изображенная точка раствора перемещается по прямой CaSO_4 М от M_1 , состав фазы находится в точке сульфата натрия. Были получены твердые фазы полей, линий и точек. Проведен их рентгенофазовый анализ. Дифрактограмма равновесных фаз для инвариантной точки представлена на рисунке 8.

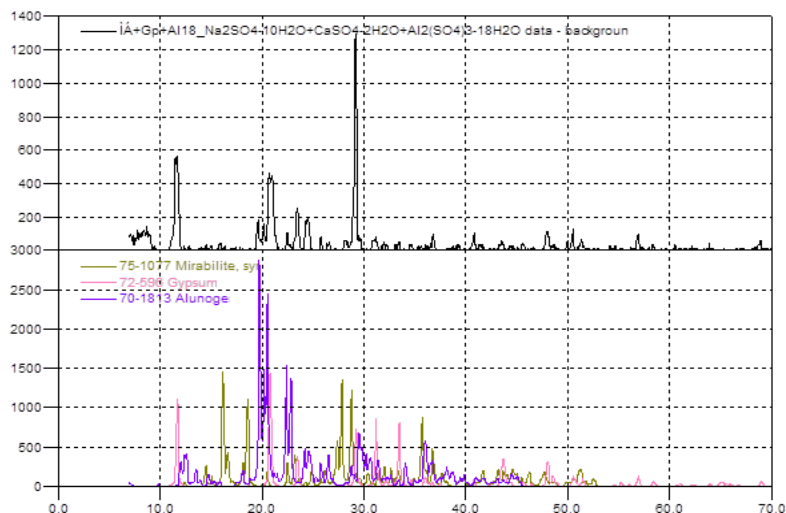


Рисунок 8 – Дифрактограмма равновесных твердых фаз для инвариантной точки системы Ca^{2+} , Na^+ , $\text{Al}^{3+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$ - H_2O при 273 К

Жидкая фаза исследуемой системы была изучена методом химического анализа (табл.3).

Таблица 3 – Растворимость солей четырехкомпонентной системы Ca^{2+} , Na^+ , $\text{Al}^{3+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$ - H_2O при 273 К

№ точки	Состав жидкой фазы, мас.%				Состав фазовых осадков
	Na_2SO_4	CaSO_4	$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$	H_2O	
e_1	4.30	-	-	95.700	Mb
e_2	-	0.176	-	99.824	Gp
e_3	-	-	23.90	76.100	Al·18
E_1^3	4.34	0.196	-	95.464	Mb + Gp
E_2^3	-	0.210	19.93	79.860	Gp + Al·18
E_3^3	5.21	-	25.16	69.630	Mb + Al·18
E_1^4	4.48	0.187	24.45	70.883	Mb + Gp + Al·18

Рисунок 9 демонстрирует разработанную нами диаграмму растворимости системы, содержащей ионы натрия, кальция, алюминия, сульфата и воду при 273 К. Построение диаграммы выполнено на основе впервые полученных данных. В рисунке 9 с применением массцентрического метода были установлены координаты инвариантных точек (E_n^3 и E_n^4), соответствующих 3-х и 4-х компонентным равновесиям (n – порядковый номер точки). Эти координаты были затем визуализированы на диаграмме.

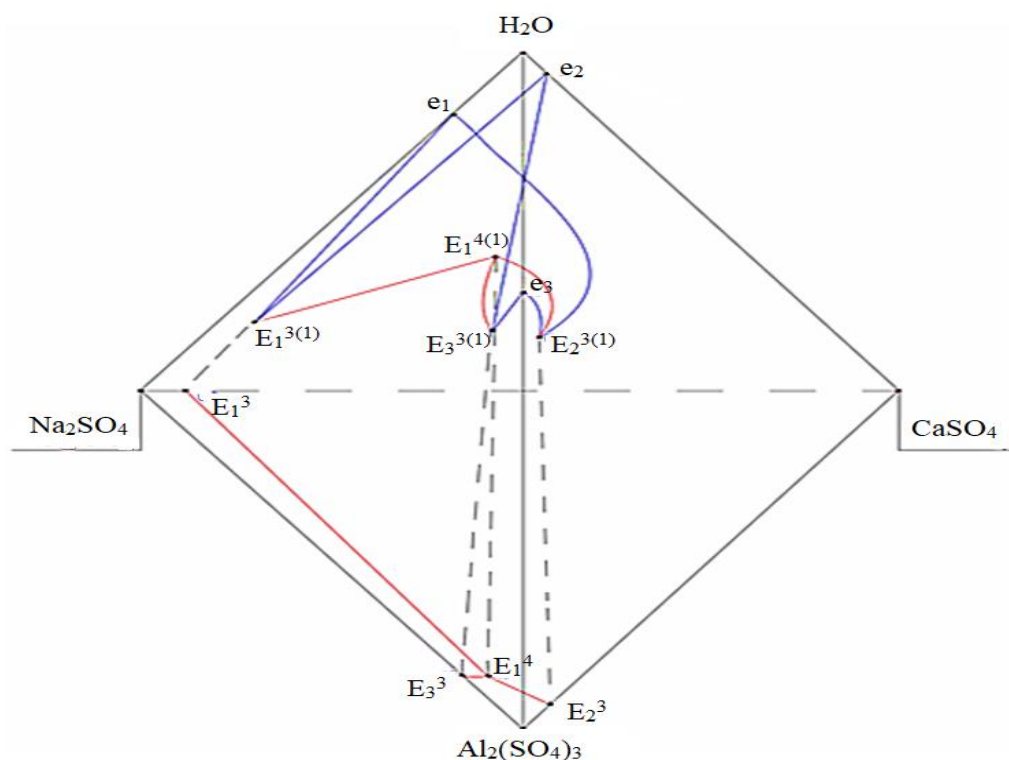


Рисунок 9 – Система $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+}, \text{Al}^{3+} \parallel \text{SO}_4^{2-} - \text{H}_2\text{O}$, её диаграмма растворимости

На рисунке 9 представлена диаграмма растворимости водной системы, содержащей ионы $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+}, \text{Al}^{3+} \parallel \text{SO}_4^{2-} - \text{H}_2\text{O}$ при температуре 273 К. Диаграмма визуально отображает области стабильности, т.е. поля кристаллизации иных равновесных фаз, в том числе показывает их размеры и относительную локацию. Исследование процессов формирования фаз и растворения в водной системе, содержащей ионы натрия, кальция, алюминия, сульфата и воду при изотермической температуре 273 К демонстрирует, что область осаждения гипса (CaSO_4) занимает ощутимую долю диаграммы состояния, что свидетельствует о его низкой растворимости. Фазовые концентрации в жидких состояниях при отдельной кристаллизации для полей и совместной кристаллизации для линий и точек установлены. Одновременно достигнутые результаты научного исследования подтверждены кристаллооптическим, рентгенофазовым и химическим методами анализа, что может быть применено во время регенерации таких отходов алюминиевого завода, которые имеют жидкое агрегатное состояние и содержат в своем составе сульфаты алюминия, натрия и кальция.

Растворимость в невариантных точках системы $\text{Ca}^{2+}, \text{Na}^+, \text{Al}^{3+} \parallel \text{SO}_4^{2-} - \text{H}_2\text{O}$ для температуры 273 К

В четырехкомпонентной системе $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+}, \text{Al}^{3+} \parallel \text{SO}_4^{2-} - \text{H}_2\text{O}$ при температуре 273 К происходит кристаллизация, в результате чего образуются следующие соединения: гипс ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), бикарбонат кальция ($\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$), мирабилит $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ и нахколит (NaHCO_3), представляющие собой сульфаты и гидрокарбонаты натрия и кальция.

Для экспериментального исследования растворимости в геометрических элементах системы $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+} \parallel \text{HCO}_3^-, \text{SO}_4^{2-} - \text{H}_2\text{O}$, который построен с нашей стороны универсальным методом трансляции, были использованы такие реагенты как $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ (ч); NaHCO_3 (ч); $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (ч); и $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ (ч).

Данные по растворимости в невариантных точках трехкомпонентной системы, взятые из литератур, и предложенные нами уровни для четырехкомпонентной системы сведены в таблицу 4.

Таблица 4 – Изотерма растворимости в геометрических формах системы второго порядка состоящей из ионов кальция, натрия, сульфата, бикарбоната и воды при температуре 273 К.

№ (е и Е)	Состав жидкой фзы, мас.%					Равновесные твёрдые фазы
	$\text{Na}_2^{+}\text{SO}_4^{2-}$	$\text{Na}^{+}\text{HCO}_3^{-}$	$\text{Ca}^{2+}\text{SO}_4^{2-}$	$\text{Ca}^{2+}(\text{HCO}_3)_2^{-}$	H_2O	
e ₁	4.300	—	—	—	95.700	Mib
e ₂	—	6.490	—	—	93.510	Nh
e ₃	—	—	0.176	—	99.824	Gp
e ₄	—	—	—	0.144	99.856	CaH
E ₁ ³	2.570	5.820	—	—	91.610	Mib + Nh
E ₂ ³	4.340	—	0.196	—	95.464	Mib + Gp
E ₃ ³	—	—	0.217	0.083	99.700	CaH + Gp
E ₄ ³	—	4.890	—	0.109	95.001	Nh + CaH
E ₁ ⁴	3.430	5.220	0.326	—	91.024	Mib + Nh + Gp
E ₂ ⁴	—	4.865	0.131	0.153	94.851	Nh + CaH +Gp

Диаграмма растворимости четырехкомпонентной системы второго порядка для температуры 273 К состоит из ионов кальция, натрия, сульфата, бикарбоната и воды. Она впервые была построена по данным таблицы 4 (рис. 10).

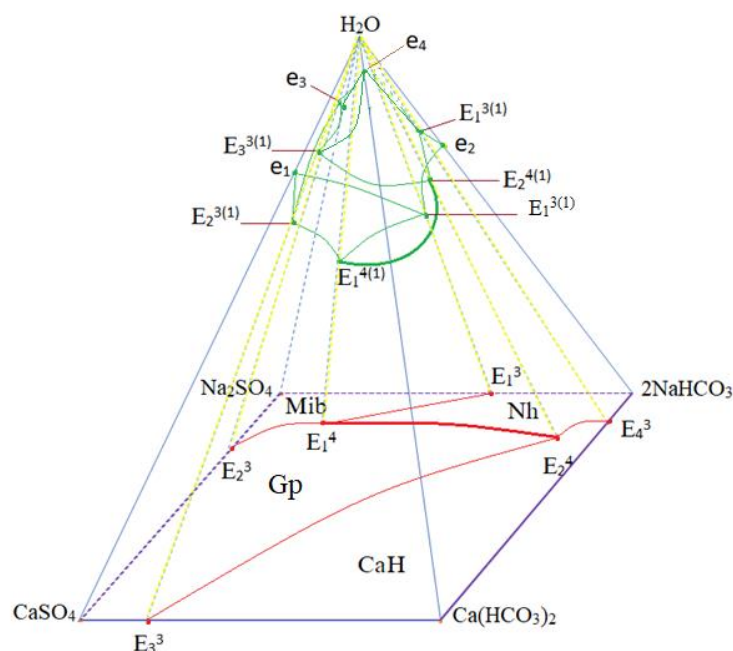


Рисунок 10 – Система второго порядка $\text{Ca}^{2+}, \text{Na}^{+}, \parallel \text{SO}_4^{2-}, \text{HCO}_3^{-} - \text{H}_2\text{O}$. Диаграмма растворимости для изотермы 273 К

Фигуративная точка изученной диаграммы состояния представляет собой соприкосновение оси координат, т.е. сторон четырёхугольника и внутренней смеси.

Из рисунка 10 четырехкомпонентной системы $\text{Ca}^{2+}, \text{Na}^{+}, \parallel \text{SO}_4^{2-}, \text{HCO}_3^{-} - \text{H}_2\text{O}$ при изотерме 273 К видно, что кристаллизация бикарбоната кальция заполняет не малую ее часть. Это подтверждает о малой растворимости бикарбоната кальция по сравнению с остальными равновесными твёрдыми фазами в заданных условиях. Мирабилит занимает небольшую часть диаграммы системы, что указывает на высокую растворимость мирабилитовой соли. В то же время, полученные результаты научного исследования подтверждены кристаллооптическими и химическими методами анализа, что может быть использовано при регенерации жидких отходов

алюминиевой промышленности, содержащих сульфаты и гидрокарбонаты натрия и кальция.

Фазообразование в системе $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+}, \text{Al}^{3+} \parallel \text{SO}_4^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$

Рассмотрены результаты изучения фазообразования на уровне четырехкомпонентной системы $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+}, \text{Al}^{3+} \parallel \text{SO}_4^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$. Для исследуемой пятикомпонентной системы определены характерные для невариантных точек твёрдые равновесные фазы (табл. 5).

Таблица 5 – Нонвариантные точки для четырехкомпонентной системы, включающей $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+}, \text{Al}^{3+} \parallel \text{SO}_4^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$ в водной среде при температуре 298 К

№(е и E)	Система	Равновесные твёрдые фазы
E_1^4	$\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+}, \text{Al}^{3+} \parallel \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$	Nh + CaH + AlH
E_2^4 E_3^4 E_4^4	$\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+}, \text{Al}^{3+} \parallel \text{SO}_4^{2-} - \text{H}_2\text{O}$	NaAl·12 + Gp + Al·18 NaAl·12 + Gp + Gb NaAl·12 + Mib + Gb
E_5^4 E_6^4	$\text{Ca}^{2+}, \text{Al}^{3+} \parallel \text{SO}_4^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$	Gp + CaH + AlH Gp + AlH + Al·18
E_7^4 E_8^4 E_9^4	$\text{Na}^+, \text{Al}^{3+} \parallel \text{SO}_4^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$	NaAl·12 + AlH + Al·18 Nh + AlH + NaAl·12 NaAl·12 + Mib + Nh
E_{10}^4 E_{11}^4 E_{12}^4	$\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$	Mib + Nh + Gb Nh + CaH + Gb Gb + CaH + Gp

На основе результатов таблицы 5 солевой части диаграммы фазообразования системы $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+}, \text{Al}^{3+} \parallel \text{SO}_4^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$ на уровне 4-х компонентной части построены и визуализированы (рис. 11).

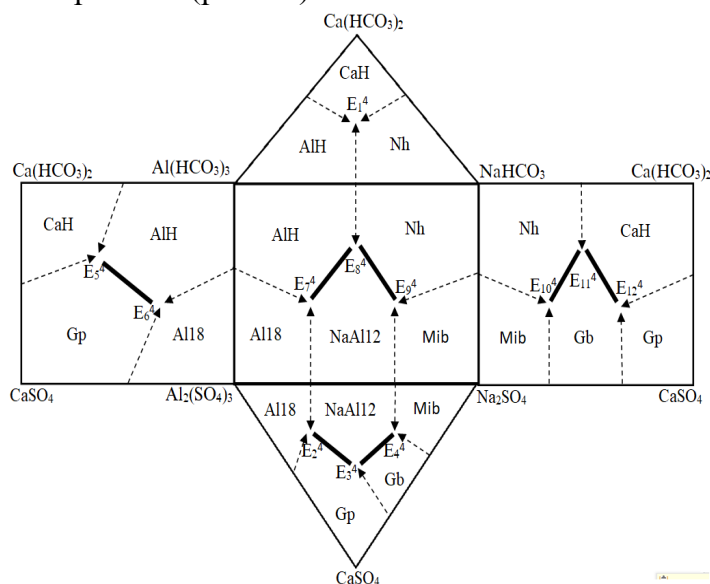


Рисунок 11 – Система $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+}, \text{Al}^{3+} \parallel \text{SO}_4^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$. Диаграмма фазообразования как «Развернутая призма» для температуры 298 К на уровне 4-х компонентности

Кристаллизация отдельных твердых равновесных фаз системы второго порядка происходит в нескольких 4-х компонентных системах. Их поля объединяются. Это значительно упрощает структуру диаграммы. В то же время в целом информация не меняется. Диаграмма фазообразования изученной системы для температуры 298 К представлена на рисунке 12.

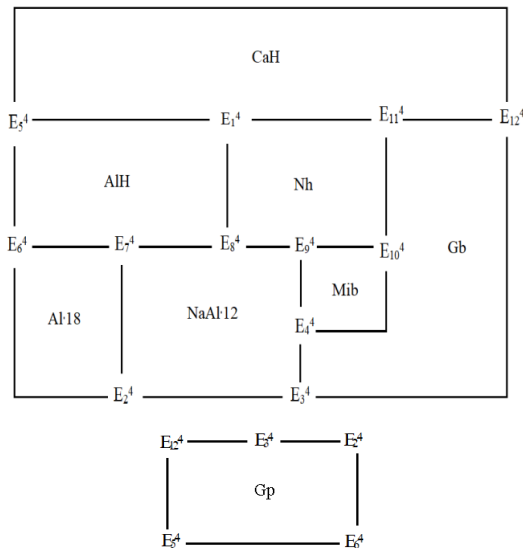
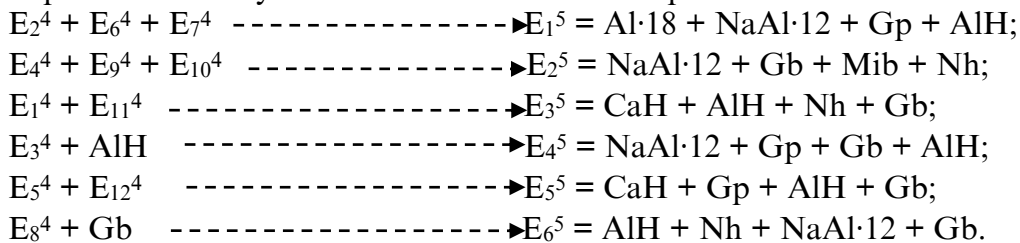


Рисунок 12 – Схематическая диаграмма фазообразования системы Na^+ , Ca^{2+} , $\text{Al}^{3+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, HCO_3^- - H_2O для температуры 298 К на уровне четырехкомпонентной системы.

Методом трансляции показано, что на пятикомпонентном уровне системы они образовали нижеуказанное количество невариантных точек.



Фазообразование системы Na^+ , Ca^{2+} , $\text{Al}^{3+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, HCO_3^- - H_2O изучено впервые с использованием метода трансляции. Построена ее диаграмма при температуре 298 К (рис. 13). На диаграмме показаны все возможные невариантные точки.

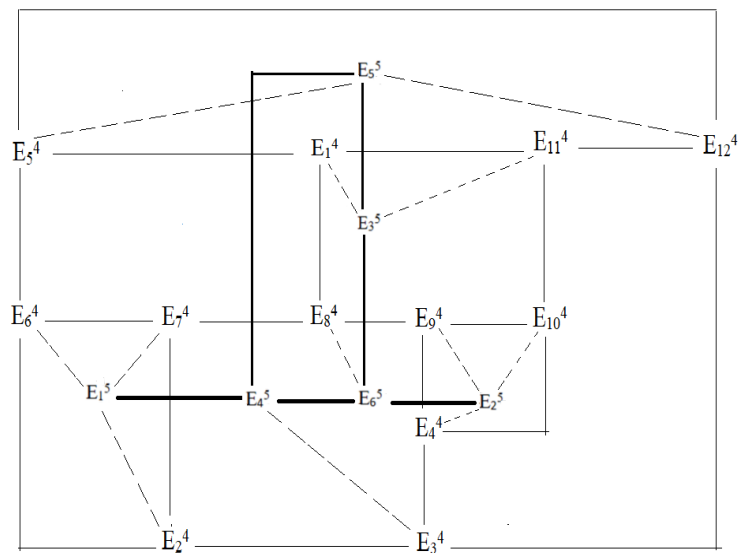


Рисунок 13 – Система Na^+ , Ca^{2+} , $\text{Al}^{3+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, HCO_3^- - H_2O при температуре 298 К на уровне четырех-пятикомпонентности. Диаграмма её фазообразования.

Кристаллизация отдельных твердых равновесных фаз исследованной системы происходит в нескольких четырехкомпонентных системах. Их поля объединяются. Это значительно упрощает структуру диаграммы, которая основана на твердых фазах, образованных в начале или в конце процесса.

**Растворимость в невариантных точках системы
Na⁺, Ca²⁺ || SO₄²⁻, HCO₃⁻ - H₂O для изотермы 298 К.**

Экспериментально исследуя растворимость в геометрических элементах системы Na⁺, Ca²⁺ || SO₄²⁻, HCO₃⁻ - H₂O, построенной методом трансляции, мы использовали следующие реактивы: Na₂SO₄·10H₂O (ч); Ca(HCO₃)₂ (ч); CaSO₄·2H₂O (ч) и NaHCO₃ (ч).

Эксперименты проводились в модельных растворах и соответствуют условиям метода трансляции в четырехкомпонентных системах. Температура смеси поддерживалась с помощью термостата марки LT-TWC/22 и постоянно контролировалась контактным термометром. Перемешивание осуществлялось мешалкой PD – 09 до достижения равновесия в растворе. Кристаллизация твердых фаз наблюдалась с помощью цифрового микроскопа марки «ПОЛАМ – Р 311», а фотосъемка проводилась фотоаппаратом «SONY Alpha ILCE-7M3 body». Был проведен химический анализ жидкой фазы (табл. 6). Одновременно результаты кристаллооптического анализа четырехкомпонентного уровня невариантных точек четырехкомпонентной обменной системы Na⁺, Ca²⁺ || SO₄²⁻, HCO₃⁻ - H₂O для температуры 298 К приведены на рисунке 14.



Рисунок 14 – Микрофотографии равновесных твердых фаз системы Ca²⁺, Na⁺ || SO₄²⁻, HCO₃⁻ - H₂O при температуре 298 К

Таблица 6 – Система второго порядка Ca²⁺, Na⁺ || SO₄²⁻, HCO₃⁻ - H₂O. Растворимость в геометрических формах системы при температуре 298 К

№ (е и Е)	Состав жидкой фазы, мас. %					Состав твёрдой фазы
	Na ⁺ HCO ₃ ⁻	Na ₂ ⁺ SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺ (HCO ₃) ₂ ⁻	Ca ²⁺ SO ₄ ²⁻	H ₂ O	
e ₁	9.310	-	-	-	90.690	Nh
e ₂	-	21.900	-	-	78.100	Mib
e ₃	-	-	0.0160	-	99.984	CaH
e ₄	-	-	-	0.219	99.780	Gp
E ₁ ³	4.160	20.680	-	-	75.160	Mib+Nh
E ₂ ³	4.890	-	0.0109	-	95.090	Nh+CaH
E ₃ ³	-	-	0.0168	0.186	99.797	CaH+Gp
E ₄ ³	-	21.750	-	0.197	78.050	Mib+Gp
E ₅ ³	-	25.780	-	0.188	74.030	Gb+Gp
E ₁ ⁴	5.200	28.380	-	0.270	66.150	Mib+Nh+Gb
E ₂ ⁴	-	25.140	0.0136	0.184	74.660	Gb+CaH+Gp
E ₃ ⁴	7.120	24.400	0.0163	-	68.460	Nh+CaH+Gb

По данным таблицы 6 впервые разработана диаграмма растворимости для четырёхкомпонентной системы второго порядка при температуре 298 К. Система состоит из ионов Ca^{2+} , $\text{Na}^+ \parallel \text{SO}_4^{2-}$, HCO_3^- - H_2O (рис. 15).

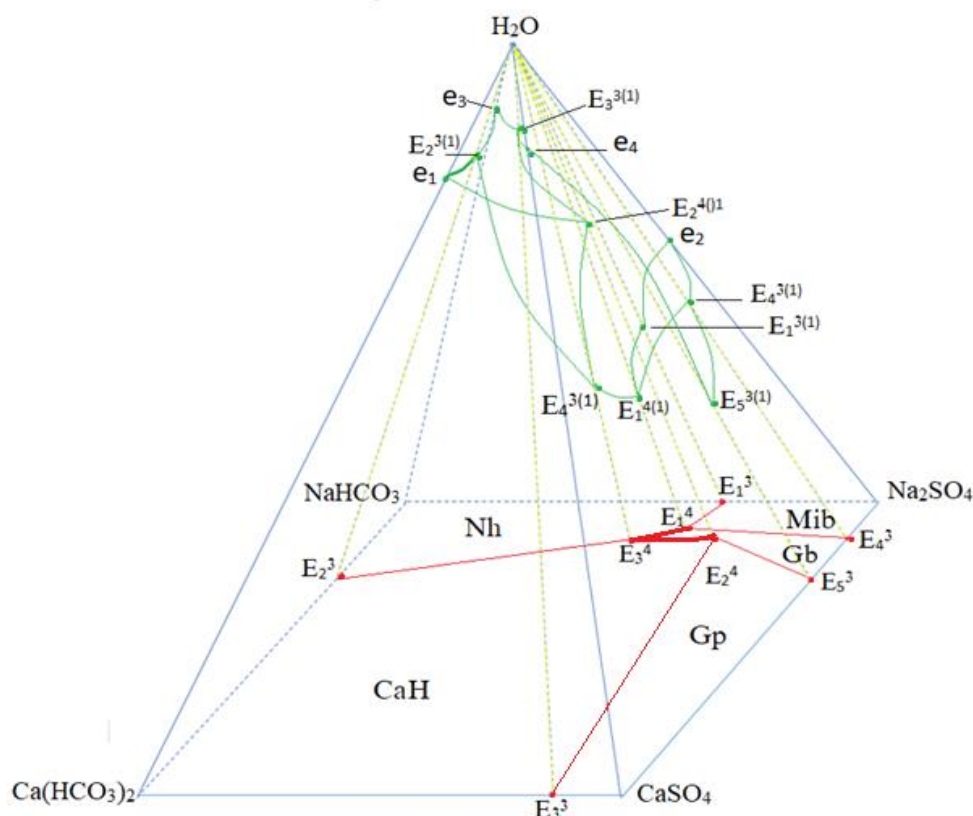


Рисунок 15 – Диаграмма растворимости системы состоящей из ионов кальция, натрия сульфата, бикарбоната и воды при температуре 298 К.

Из результатов исследования диаграммы видно, что фигуративная точка соответствует как соединению осей координат (сторонам четырехугольника), так и внутренней смеси диаграммы.

На рисунке 15 представлены диаграммы четырёхкомпонентной системы Ca^{2+} , $\text{Na}^+ \parallel \text{SO}_4^{2-}$, HCO_3^- при изотерме 298 К. На ней видно, что территория кристаллизации бикарбоната кальция $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ занимает существенную часть диаграммы, которое подтверждает низкую растворимость $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ по сравнению с другими равновесными твердыми фазами в приведенных условиях. Мирабилит занимает небольшую часть диаграммы системы, что указывает на высокую растворимость этой соли.

Для установления фазового равновесия твердых фаз в анализируемой вышеприведенной системе был использован кристаллооптический метод [92-94]. Наблюдение равновесных твердых фаз системы визуально воплощалось при помощи микроскопа. При документации была использована фотосъемка. На рисунке 39 показаны микрофотографии для отдельных твердых фаз. Указана также совместная кристаллизация этих фаз, которые наблюдались в неинвариантных точках трёх- и четырёхкомпонентных поверхностей. Результаты проведенного исследования процессов фазообразования и растворимости в системе Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, HCO_3^- - H_2O при изотерме 298 К и строение диаграммы говорят о том, что граница кристаллизации бикарбоната кальция ($\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$) заполняет немалую часть диаграммы, что доказывает малую растворимость этого соединения в заданных

условиях. В процессе исследований нами были использованы кристаллооптический и химические методы анализа систем. Во время разработки технологий для регенерации жидких отходов алюминиевого завода будут использованы выявленные закономерности. Нужно отметить, что состав жидких фаз алюминиевого завода содержит бикарбонаты и сульфаты натрия и кальция.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

- 1 Изучение образования фаз спрогнозировано для изотерм 273 и 298 К не только в обменной химической системе Ca^{2+} , Na^+ , $\text{Al}^{3+} \parallel \text{HCO}_3^-$, SO_4^{2-} - H_2O , но и в четырёхкомпонентных системах входящих в его состав Na^+ , Ca^{2+} , $\text{Al}^{3+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$ - H_2O ; Na^+ , Ca^{2+} , $\text{Al}^{3+} \parallel \text{HCO}_3^-$ - H_2O ; Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, HCO_3^- - H_2O ; Na^+ , $\text{Al}^{3+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, HCO_3^- - H_2O и Ca^{2+} , $\text{Al}^{3+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, HCO_3^- - H_2O . Впервые построены их развернутые диаграммы [5-М, 7-М, 9-М, 10-М].
- 2 Установлено, что фазовые превращения в исследуемой системе полностью описываются её геометрическими формами. Для пятикомпонентной обменной физико-химической системы Ca^{2+} , $\text{Al}^{3+} \parallel \text{HCO}_3^-$, SO_4^{2-} - H_2O в изотерме 273 и 298 К установлено следующее число геометрических образов в виде 3 и 6 нонвариантных точек, 10 и 18 моновариантных линий а также 12 и 19 дивариантных полей [8-М, 11-М].
- 3 Пятикомпонентная химическая система второго порядка, включающая катионы кальция, натрия, алюминия и анионы бикарбоната, сульфата, а также воду, была исследована с помощью диаграмм фазовых равновесий. С использованием метода трансляции каждая диаграмма была разбита на две части. Это поля, совместной кристаллизации двух фаз в 5-компонентной системе второго порядка, а также поля, соответствующие кристаллизации отдельных фаз в 4-хкомпонентных системах второго порядка [11-М, 12-М].
- 4 Проанализирована растворимость в таких четырёхкомпонентных системах как: Ca^{2+} , Na^+ , $\text{Al}^{3+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$ - H_2O (273 К) и Na^+ , Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, HCO_3^- - H_2O (273 и 298 К), впервые построены их диаграммы состояния. Полученные данные по растворимости подтверждены и доказаны методами рентгенофазового, кристаллооптического и химического анализов, они полностью согласуются с данными, полученными методом трансляции. На основе построенной диаграммы разработана принципиальная технологическая схема [3-М, 4-М, 5-М, 12-М].
- 5 Теоретические и экспериментальные данные, которые были получены в процессе изучения, будут использованы в качестве справочных материалов и пособий во время анализа многокомпонентных химических систем. Кроме этого, эти данные представляют научную основу для разработки эффективных методов по переработке природного и промышленного сырья, содержащего сложный состав (гидрокарбонаты натрия, сульфаты натрия, кальция и алюминия) [1-М, 2-М, 5-М, 6-М, 11-М].

Рекомендации по практическому использованию результатов данной диссертационной работы

Понимание закономерностей фазообразования в многокомпонентной системе Na^+ , Ca^{2+} , $\text{Al}^{3+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, HCO_3^- - H_2O является одним из основных (ключевых) моментов проведенного исследования. Это обусловлено тем, что данная система включает такие важные соединения, как мирабилит ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$), нахколит (NaHCO_3), гипс ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), гидрокарбонат кальция ($\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$), октадекагидрат сульфата алюминия ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$) и гидрокарбонат алюминия ($\text{Al}(\text{HCO}_3)_3$), которые играют важнейшую роль в различных отраслях промышленности в зависимости от их применения. Их можно использовать: безводный сульфат натрия в стекольной промышленности, производстве жидких

моющих средств, кожевенной промышленности и др.; гидрокарбонат натрия в химической, пищевой, медицинской и др. отраслях; сульфат кальция в производстве гипса, в качестве коагулянта в производстве тофу; октадекагидрат сульфата алюминия в качестве коагулянта для очистки воды, в производстве бумаги, кожевенной промышленности и др.; гидрокарбонат алюминия в медицине как антацидное средство, в косметике как зубная паста, в промышленности для очистки воды, в качестве катализатора для окрашивания тканей и др. Вышеупомянутые вещества присутствуют в жидких отходах завода по производству алюминия, который находится в городе Турсунзаде, они встречаются как многокомпонентные системы. Результаты исследования фазового равновесия в 5-компонентной системе Na^+ , Ca^{2+} , $\text{Al}^{3+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, HCO_3^- - H_2O могут быть применены как научная основа для реализации технологий переработки как полиминерального, так и комплексного технического сырья, в состав которых входят сульфаты натрия, гидрокарбонаты натрия, а также карбонаты и сульфаты кальция и алюминия.

При решении конкретных практических задач диаграмма фазообразования исследуемой 5-и-компонентной системы при любой степени вариантности системы может быть фрагментирована по областям кристаллизации отдельных соединений.

ПЕРЕЧЕНЬ НАУЧНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Малый патент на изобретение

[1-М]. Малый патент № TJ 1341 РТ. Способ получения декагидрата карбоната натрия из жидких отходов алюминиевого производства / М.Т.Жумаев, И.М.Низомов, Х.Р.Махмадов, **Н.В.Олимджонова**, Д.З.Музафарова; патентообладатель – Жумаев М.Т. - № 2201674 дата подачи заявки 05.05.2022. Зарегистрировано 30.01.2023.

[2-М]. Малый патент № TJ 1454 РТ. Способ получения нахколита из жидких отходов алюминиевого производства / М.Т. Жумаев, М. Раҳимова, Х.Р. Маҳмадов, **Н.В. Олимҷонова**, Д.З. Музафарова; патентообладатель – Жумаев М.Т. - № 2301862 дата подачи заявки 17.07.2023. Зарегистрировано 04.12.2023.

Статьи, опубликованные в научных журналах, рекомендованных ВАК при Президенте Республики Таджикистан:

[3-М]. **Олимҷонова, Н.В.** Таҳлили муқоисавии сохтори комплекси фазагии системаи $\text{Na}_2\text{SO}_4\text{--Na}_2\text{CO}_3\text{--NaHCO}_3\text{--H}_2\text{O}$ дар ҳароратҳои 75 ва 100 °C / **Н.В. Олимҷонова**, Л. Солиев, М.Т. Жумаев, Р.О. Тураев, Х.Р. Махмадов // Паёми Донишгоҳи миллии Тоҷикистон. Бахши илмҳои табиӣ. -2019. -№ 2. -С.179-184.

[4-М]. **Олимджонова, Н.В.** Фазовый комплекс взаимной системы $\text{Na, Ca} \parallel \text{SO}_4, \text{CO}_3\text{--H}_2\text{O}$ при 75 и 100 °C / **Н.В. Олимджонова**, Л. Солиев, М.Т. Жумаев, Х.Р. Махмадов, Д.З. Музафарова // ДАН Республики Таджикистан. -2020. -Т.63. -№9-10. -С.618-625.

[5-М]. **Олимҷонова, Н.В.** Таҳлили муқоисавии диаграммаи ҳалшавандагии системаи $\text{Na, Ca} \parallel \text{SO}_4, \text{CO}_3\text{--H}_2\text{O}$ дар ҳароратҳои 0, 25 ва 50 °C / **Н.В. Олимҷонова**, Л. Солиев, М.Т. Жумаев, Х.Р. Махмадов, Д.З. Музафарова // Паёми Донишгоҳи омузгорӣ: Бахши илмҳои табиатшиносӣ. -2021. -№1(10-11). -С.253-257.

[6-М]. **Олимджонова, Н.В.** Растворимость системы $\text{Na}_2\text{SO}_4\text{--Na}_2\text{CO}_3\text{--NaHCO}_3\text{--H}_2\text{O}$ при 75 °C / **Н.В. Олимджонова**, Л. Солиев, М.Т. Жумаев, О.Р. Тураев, Х.Р. Махмадов // Известия НАНТ. -2021. -№1(182). -С.82-89.

[7-М]. **Олимджонова, Н.В.** Фазообразование системе в $\text{Na, Ca, Al} \parallel \text{SO}_4, \text{HCO}_3\text{--H}_2\text{O}$ при 298 К / **Н.В.Олимджонова**, М.Т.Жумаев, Л.Солиев. // Известия НАНТ. -2023. -№2(191). -С.46-54.

[8-М]. **Олимджонова, Н.В.** Сравнение фазовых равновесий в системе $\text{Na}_2\text{SO}_4\text{--Al}_2(\text{SO}_4)_3\text{--CaSO}_4\text{--H}_2\text{O}$ при температуре 273 и 298 К / **Н.В. Олимджонова**, М.Т. Джумаев, Д.З. Музафарова // Вестник Филиала Московского государственного университета. -2023. -Т.1. -№3(33). -С.53-61.

[9-M]. **Олимҷонова, Н.В.** Сатҳи чоркомпонентаи мувозинатҳои фазагии системаи $K, Ca//SO_4, CO_3, HCO_3, F-H_2O$ дар ҳарорати 25 °C. / **Н.В. Олимҷонова, Ҷ.М. Мусочонзода, Л.Ч. Имомова, Д.З. Музафарова, М.Т. Жумаев, Л. Солиев** // Паёми политехникӣ. Бахши илмҳои муҳандисӣ. -2024. -№3(66). -С.159-165.

[10-M]. **Олимджонова, Н.В.** Изотерма фазообразования в системе $Na^+, Ca^{2+} // SO_4^{2-}, HCO_3^- - H_2O$ при 298 К / **Н.В. Олимджонова, М.Т. Жумаев, Л. Солиев** // Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. -№ 1(65). -2024. -С.108-111.

[11-M]. **Olimjonova, N.V.** Phase formation in the system $Na^+, Ca^{2+}, Al^{3+} // SO_4^{2-}, HCO_3^- - H_2O$ at 273 K / **N.V. Olimjonova, D.Z. Muzafarova, M.T. Jumaev, H.R. Mahmudov, Sh.S. Davlatshozoda, I.M. Nizomov** // E3S Web of Conferences International Scientific Conference Energy Management of Municipal Facilities and Environmental Technologies (EMMFT-2024). Volume 592 (2024). (**Scopus**).

[12-M]. **Олимджонова, Н.В.** Сравнение растворимости в системе $Na, Ca // SO_4, HCO_3 - H_2O$ при 273 и 298 К / **Н.В. Олимджонова, М.Т. Жумаев, Д.З. Музафарова, Дж.М. Мусоджонзода** // Известия НАНТ. -2024. -№4(197). -С.85-91.

Тезисы статей в материалах научных конференций:

[13-M]. **Олимджонова, Н.В.** Строение диаграммы фазового комплекса системы $Na_2SO_4 - Na_2CO_3 - NaHCO_3 - H_2O$ при 75 и 100 °C / **Н.В. Олимджонова, М.Т. Жумаев, Л. Солиев, Д.З. Музафарова, Х.Р. Махмадов** // Материалы IV Всероссийской молодежной научной конференции с международным участием «Экологобезопасные и ресурсосберегающие технологии и материалы». -Улан-Уде, 2020. -С.69-71.

[14-M]. **Олимҷонова, Н.В.** Комплекси фазагии системаи $Na, Ca // SO_4, CO_3 - H_2O$ дар ҳароратҳои 75 ва 100 °C / **Н.В. Олимҷонова, Л. Солиев, Ҳ.Р. Маҳмадов, М.Т. Жумаев, Д.З. Музафарова** // Маводи конференсияи байналмилалӣ илмию амалӣ дар мавзӯи «Проблемаҳои муосири саноати металлургӣ» -Душанбе, 2021. -С.160-163.

[15-M]. **Олимджонова, Н.В.** Равновесные твёрдые фазы четверных невариантных точек системы $Na, Ca // SO_4, CO_3, HCO_3 - H_2O$ при 0 °C / **Н.В. Олимджонова, М.Т. Жумаев, Л. Солиев, Х.Р. Махмадов** // Сборник трудов Всероссийского симпозиума и школы-конференции молодых ученых «Физико-химические методы в междисциплинарных экологических исследованиях». –Москва, 2021. -С.262-263.

[16-M]. **Олимджонова, Н.В.** Фазовые равновесия и растворимость в системе $Na_2SO_4 - Na_2CO_3 - NaHCO_3 - H_2O$ при 75 °C / **Н.В. Олимджонова, Л. Солиев, М.Т. Жумаев, Х.Р. Махмадов** // Материалы Всероссийской научной конференции с международным участием «IV Байкальский материаловедческий форум». -Улан-Удэ, 2022. -С.125-126.

[17-M]. **Олимджонова, Н.В.** Сравнение фазовых равновесий в системе $Na_2SO_4 - Al_2(SO_4)_3 - CaSO_4 - H_2O$ при температуре 273 и 298 К, / **Л. Солиев, М.Т. Жумаев, Н.В. Олимджонова, Д.З. Музафарова** // Материалы международной научно-практической конференции “Развитие новых направлений в химии и химической технологии”. — Душанбе, -2023. -С. 157-161.

[18-M]. **Олимджонова, Н.В.** Изотерма фазообразования в четырёхкомпонентной системе $Na, Ca // SO_4, HCO_3 - H_2O$ при 298 К / **Н.В. Олимджонова, Л. Солиев, М.Т. Жумаев, Н.З. Ноибова** // Всероссийская конференция и школа молодых учёных “Физико-химические методы в междисциплинарных экологических исследованиях”. – Москва, -2023. -С.168-169.

[19-M]. **Олимҷонова, Н.В.** Фазахосилшавӣ дар системаи $Na, Ca, Al // SO_4, CO_3 - H_2O$ дар изотермаи 273 К, / **Н.В. Олимҷонова, Л. Солиев, М.Т. Жумаев**. // Конференсияи Чумхуриявӣ илмӣ-амалӣ дар мавзӯи “Вазъи кунунӣ ва дурнамои таҳлили физико-химиявӣ. –Душанбе, -2023. -С.209-215.

[20-M]. **Олимджонова, Н.В.** Растворимость системы $Na, Ca // SO_4, CO_3 - H_2O$ при 273 и 298 К. / **Н.В. Олимджонова, Д.З. Музафарова, М.Т. Жумаев, Л. Солиев** // Сборник материалов XIX Нумановские чтения на тему “Развитие фундаментальной и

прикладной химии и её вклад в индустриализацию страны”. –Душанбе, -2024. -С.63-66.

[21-M]. **Olimjonova, N.V.** Concentrated parameters of the formation of modern solid phases of Na,Ca,Al//SO₄, HCO₃-H₂O systems at 273 K. / **N.V. Olimjonova, M.T. Jumaev, L. Soliev** // Collection articles by participants of the international scientific and practical conference "Chemical Science and Education, problems and prospects of development". – Makhachkala, -2024. -pp. 61-66.

[22-M]. **Олимджонова, Н.В.** Концентрационные параметры образования равновесных твёрдых фаз системы Na⁺,Ca²⁺,Al³⁺||SO₄²⁻,HCO₃⁻-H₂O при 273 К. / **Н.В. Олимджонова, М.Т. Жумаев, Л. Солиев** // XXII Менделеевский съезд по общей и прикладной химии. –Сириус, -2024. –Т. 6. -С.64.

[23-M]. **Олимджонова, Н.В.** Прогнозирование фазовых равновесий в системе Na,Ca,Al||SO₄,HCO₃-H₂O при 298 К. / М.Т. Жумаев, **Н.В. Олимджонова, Л. Солиев** // IV Международной научной конференции «Вопросы физической и координационной химии». –Душанбе, -2024. -С. 349-353.

[24-M]. **Олимҷонова, Н.В..** Таҳлили муқоисавии фазаҳосилшавӣ дар системаи Na⁺,Al³⁺||SO₄²⁻,HCO₃⁻-H₂O дар 273 ва 298К / **Н.В.Олимҷонова** // Конференсияи Ҷумҳуриявӣ илмӣ-амалӣ дар мавзӯи “Вазъи кунунӣ ва дурнамои таҳлили физико-химиявӣ. -Душанбе, -2025. -С.188-191.

[25-M]. **Олимджонова, Н.В.** Сравнение фазообразований в системе Na,Al||SO₄,HCO₃-H₂O при 273 и 298 К / IX Международная научно-практическая конференция «Булатовские чтения». –Краснаярск, -2025. С.173.

[26-M]. **Olimjonova, N.V.** Equilibrium phase diagram and stable phases present in the system Na,Ca||SO₄,HCO₃-H₂O at temperatures of 273 and 298 K / **N.V.Olimjonova, M.T.Jumaev, L.Soliev** // Proceedings of the All-Russian scientific conference with international participation "IV Baikal Materials Science Forum". -Ulan-Ude, -2025. – С.214.

АННОТАЦИЯ

ба рисолаи Олимҷонова Нилуфар Ваҳобҷонова дар мавзӯи «Ҳалшавандагӣ ва фазаҳосилшавии системаи Na^+ , Ca^{2+} , $\text{Al}^{3+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, $\text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$ дар ҳароратҳои 273 ва 298 К» барои дарёфти дараҷаи илмӣ доктори фалсафа (PhD) аз рӯи ихтисоси 6D060601-Химия (6D060601-Химияи ғайриорганикӣ)

Калимаҳои калидӣ: компонент, фазаҳосилшавӣ, система, ҳалшавандагӣ, фазаи сахт, фазаи моеъ, кристаллизатсия, диаграмма, изотерма.

Объекти таҳқиқоти илмӣ: системаи бисёркомпонентаи Na^+ , Ca^{2+} , $\text{Al}^{3+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, $\text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$, субсистемаҳои компонентнокиашон чори Na^+ , Ca^{2+} , $\text{Al}^{3+} \parallel \text{SO}_4^{2-} - \text{H}_2\text{O}$; Na^+ , Ca^{2+} , $\text{Al}^{3+} - \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$; Ca^{2+} , $\text{Al}^{3+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, $\text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$; Na^+ , $\text{Al}^{3+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, $\text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$; Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, $\text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$ ва 9 системаҳои секомпонентаи дигар мебошанд.

Ҳадафи таҳқиқоти мазкур муайянсозии фазаҳосилшавӣ ва ҳалшавандагӣ дар системаи бисёркомпонентаи муовизаи обӣ-намакӣ иборат аз катионҳои натрий, калсий, алюминий ва анионҳои сулфат, гидрокарбонат дар ҳароратҳои 273 ва 298 К ва омӯзиши параметрҳои концентратсионии фазаҳо дар шаклҳои геометрии майдонҳо, хатҳо ва нуқтаҳо мебошад.

Усулҳои таҳқиқоти рисолаи илмӣ омӯзиши фазаҳосилшавӣ дар системаи бисёркомпонентаи Na^+ , Ca^{2+} , $\text{Al}^{3+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, $\text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$ ва зерсистемаҳои таркибии он дар ҳароратҳои 273 ва 298 К, инчунин омӯзиши ҳалшавандагӣ дар зерсистемаҳои чоркомпонентаи Na^+ , Ca^{2+} , $\text{Al}^{3+} - \text{SO}_4^{2-} - \text{H}_2\text{O}$ дар ҳарорати 273 К ва Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, $\text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$ дар ҳароратҳои 273 ва 298 К бо ёрии усули транслятсия ва массентрӣ мебошад.

Навгонии илмӣ диссертатсияи доктор (PhD) – и иҷрошуда дар он ба назар мерасад, ки:

- омӯзиши ҳолати системаи 5 - компонентаи таҳқиқшаванда ва субсистемаҳои 3 - ва 4 - компонентаи онро ташкилкунада ба роҳ монда шуда, диаграммаҳои фазаҳосилшавиашон сохта шудааст;

- муайян намудани раванди фазаҳосилшавӣ дар системаҳои бисёркомпонента ва зерсистемаҳои онҳо як натиҷаи нави илмӣ гардид. Бо истифода аз усули транслятсия ва таҳлили мувозинатҳои фазагӣ дар зерсистемаҳо, бори аввал шумораи конфигуратсияҳои геометрии фазаҳо муқаррар карда шуд;

- дар системаҳои 4-компонента, дар асоси диаграммаҳои сохташуда, равандҳои тақсимшавии минтақаҳои кристаллизатсияи фазаҳои алоҳида таҳқиқ карда шуданд. Илова бар ин, дар системаҳои 5-компонента, минтақаҳои ҷудошавии якҷояи ду фазаҳо омӯхта шуданд;

- аз рӯи натиҷаҳои эксперименталии ҳалшавандагӣ аввалин маротиба таҳқиқи изотермии системаҳои чоркомпонентаи Na^+ , Ca^{2+} , $\text{Al}^{3+} - \text{SO}_4^{2-} - \text{H}_2\text{O}$, Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, $\text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$ дар 273 ва 298 К амалӣ гардида, диаграммаҳои ҳолатӣ (ҳалшавандагӣ)-и онҳо сохта шудааст. Аввалин маротиба дар асоси диаграммаи ҳолатии зерсистемаҳои системаи химиявии таҳқиқшаванда схемаи принципалии технологияи тарзҳои ҷудокунии фазаҳои саҳти алоҳида аз партовҳои моеъи саноатӣ алюминий пешниҳод карда шудааст.

Дараҷаи истифодабарӣ. Далелҳои ба дастамада оид ба фазаҳосилшавӣ дар шаклҳои геометрии системаи мазкур, ҳамчун далелҳои маълумотномавӣ барои омӯзиши фазаҳосилшавии системаҳои мураккаби тартиби дуҷуми ин системаро ташкилдиханда истифода бурда амешавад.

Тадбиқи амалии натиҷаҳои таҳқиқот. Системаи мазкур пайвастагиҳои муҳимро, ба монанди мирабилит, нахколит, гипс, гидрокарбонати калсий, октадекагидрати сулфати алюминий ва гидрокарбонати алюминийро дар бар мегирад, ки вобаста ба истифодаашон дар соҳаҳои гуногуни саноат нақши муҳим мебозанд. Ии моддаҳо дар партовҳои моеъи заводи истеҳсоли алюминий, ки дар шаҳри Турсунзода ҷойгир аст, мавҷуданд ва онҳо ҳамчун системаҳои бисёркомпонента вомехӯранд. Натиҷаҳои таҳқиқи мувозинати фазагӣ дар системаи 5-компонентаи Na^+ , Ca^{2+} , $\text{Al}^{3+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, $\text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$ метавонанд ҳамчун асоси илмӣ барои татбиқи технологияҳои коркарди ҳам полиминералӣ ва ҳам ашёи хоми мураккаби техникӣ, ки ба таркиби онҳо сулфатҳои натрий, гидрокарбонатҳои натрий, инчунин карбонатҳо ва сулфатҳои калсий ва алюминий дохил мешаванд, истифода шаванд.

АННОТАЦИЯ

к диссертации Олимджоновой Нилуфар Вахобджоновны на тему «Растворимость и фазообразование системы Na^+ , Ca^{2+} , $\text{Al}^{3+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, HCO_3^- - H_2O при температурах 273 и 298 К» на соискание учёной степени доктора философии (PhD) по специальности 6D060601 – химия (6D060601 – неорганическая химия)

Ключевые слова: компонент, фазообразование, система, растворимость, твёрдая фаза, жидкая фаза, кристаллизация, диаграмма, изотерма.

Объект научного исследования: многокомпонентная система Na^+ , Ca^{2+} , $\text{Al}^{3+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, HCO_3^- - H_2O , её четырёхкомпонентные подсистемы: Na^+ , Ca^{2+} , Al^{3+} - SO_4^{2-} - H_2O ; Na^+ , Ca^{2+} , Al^{3+} - HCO_3^- - H_2O ; Ca^{2+} , $\text{Al}^{3+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, HCO_3^- - H_2O ; Na^+ , $\text{Al}^{3+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, HCO_3^- - H_2O ; Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, HCO_3^- - H_2O , а также 9 других трёхкомпонентных систем.

Целью данного исследования является определение фазообразования и растворимости в многокомпонентной водно-солевой обменной системе, состоящей из катионов натрия, кальция, алюминия и анионов сульфата, гидрокарбоната при температурах 273 К и 298 К, а также изучение концентрационных параметров фаз в геометрических формах полей, линий и точек.

Методы исследования диссертации включают изучение фазообразования в многокомпонентной системе Na^+ , Ca^{2+} , $\text{Al}^{3+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, HCO_3^- - H_2O и её подсистемах при температурах 273 К и 298 К, а также изучение растворимости в четырёхкомпонентных подсистемах Na^+ , Ca^{2+} , $\text{Al}^{3+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$ - H_2O при температуре 273 К и Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, HCO_3^- - H_2O при температурах 273 К и 298 К с использованием метода трансляции и масс-центрического метода.

Научная новизна выполненной докторской диссертации (PhD) заключается в следующем:

- изучено состояние исследуемой 5-компонентной системы и образующих ее 3- и 4-компонентных подсистем, а также построены их диаграммы фазообразования;

- определение процесса фазообразования в многокомпонентных системах и их подсистемах стало новым научным результатом. Впервые с использованием метода трансляции и анализа фазовых равновесий в подсистемах было установлено количество геометрических конфигураций фаз;

- в 4-компонентных системах на основе построенных диаграмм были исследованы процессы распределения областей кристаллизации отдельных фаз. Кроме того, в 5-компонентных системах были изучены области совместного выделения двух фаз;

- впервые на основе экспериментальных данных по растворимости было проведено изотермическое исследование четырёхкомпонентных систем Na^+ , Ca^{2+} , $\text{Al}^{3+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$ - H_2O , Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, HCO_3^- - H_2O при 273 К и 298 К, и построены их фазовые (растворимости) диаграммы. Впервые на основе фазовой диаграммы подсистем исследуемой химической системы предложена принципиальная технологическая схема способов разделения отдельных твердых фаз из жидких промышленных отходов алюминия.

Степень использования. Данная система включает такие важные соединения, как мирабилит, нахколит, гипс, гидрокарбонат кальция, сульфата алюминия и гидрокарбонат алюминия, которые играют важнейшую роль в различных отраслях промышленности в зависимости от их применения. Эти вещества присутствуют в жидких отходах завода по производству алюминия, который находится в городе Турсунзаде, они встречаются как многокомпонентные системы. Результаты исследования фазового равновесия в 5-и-компонентной системе Na^+ , Ca^{2+} , $\text{Al}^{3+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, HCO_3^- - H_2O могут быть применены как научная основа для реализации технологий переработки как полиминерального, так и комплексного технического сырья, в состав которых входят сульфаты натрия, гидрокарбонаты натрия, а также карбонаты и сульфаты кальция и алюминия.

ABSTRACT

dissertation by Olimjonova Nilufar Vahobdjonovna
on the topic «Solubility and phase formation in the system Na^+ , Ca^{2+} , $\text{Al}^{3+}||\text{SO}_4^{2-}$, HCO_3^- - H_2O at 273 K and 298 K» for the degree of Doctor of Philosophy (PhD) in the specialty
6D060601 – chemistry (6D060601 – inorganic chemistry)

Keywords: component, phase formation, system, solubility, solid phase, liquid phase, crystallization, diagram, isotherm.

Object of scientific research: the multicomponent system Na^+ , Ca^{2+} , $\text{Al}^{3+}||\text{SO}_4^{2-}$, HCO_3^- - H_2O , its four-component subsystems: Na^+ , Ca^{2+} , Al^{3+} - SO_4^{2-} - H_2O ; Na^+ , Ca^{2+} , Al^{3+} - HCO_3^- - H_2O ; Ca^{2+} , $\text{Al}^{3+}||\text{SO}_4^{2-}$, HCO_3^- - H_2O ; Na^+ , $\text{Al}^{3+}||\text{SO}_4^{2-}$, HCO_3^- - H_2O ; Na^+ , $\text{Ca}^{2+}||\text{SO}_4^{2-}$, HCO_3^- - H_2O , as well as 9 other three-component systems.

The aim of this research is to determine the phase formation and solubility in a multicomponent aqueous-salt reciprocal system consisting of sodium, calcium, and aluminum cations, and sulfate and bicarbonate anions at temperatures of 273 K and 298 K. It also aims to study the concentration parameters of phases in the geometric forms of fields, lines, and points.

Research methods: The dissertation's research methods include studying phase formation in the multicomponent system Na^+ , Ca^{2+} , $\text{Al}^{3+}||\text{SO}_4^{2-}$, HCO_3^- - H_2O and its subsystems at temperatures of 273 K and 298 K. Furthermore, it investigates solubility in the four-component subsystems Na^+ , Ca^{2+} , $\text{Al}^{3+}||\text{SO}_4^{2-}$ - H_2O at 273 K and Na^+ , $\text{Ca}^{2+}||\text{SO}_4^{2-}$, HCO_3^- - H_2O at 273 K and 298 K, utilizing the translation method and the mass-centric method.

The scientific novelty of the completed doctoral dissertation (PhD) is that:

- the state of the investigated 5-component system and its constituent 3- and 4-component subsystems has been studied, and their phase formation diagrams have been constructed.

- the determination of the phase formation process in multicomponent systems and their subsystems represents a new scientific result. For the first time, using the translation method and analysis of phase equilibria in subsystems, the number of geometric configurations of phases was established.

- in 4-component systems, based on the constructed diagrams, the processes of distribution of crystallization regions for individual phases were investigated. Additionally, in 5-component systems, the regions of co-precipitation of two phases were studied.

- for the first time, based on experimental solubility data, an isothermal study of the four-component systems Na^+ , Ca^{2+} , $\text{Al}^{3+}||\text{SO}_4^{2-}$ - H_2O , Na^+ , $\text{Ca}^{2+}||\text{SO}_4^{2-}$, HCO_3^- - H_2O at 273 K and 298 K was conducted, and their phase (solubility) diagrams were constructed. For the first time, based on the phase diagram of the subsystems of the investigated chemical system, a principal technological scheme for separating individual solid phases from liquid industrial aluminum waste has been proposed.

Degree of utilization: This system includes important compounds such as mirabilite, nahcolite, gypsum, calcium bicarbonate, aluminum sulfate, and aluminum bicarbonate, which play a crucial role in various industries depending on their application. These substances are present as multicomponent systems in the liquid waste of the aluminum plant located in Tursunzade city. The results of the study on phase equilibrium in the 5-component system Na^+ , Ca^{2+} , $\text{Al}^{3+} || \text{SO}_4^{2-}$, HCO_3^- - H_2O can be applied as a scientific basis for implementing technologies for processing both polymineral and complex technical raw materials that contain sodium sulfates, sodium bicarbonates, as well as calcium and aluminum carbonates and sulfates.