

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

Бо ҳуқуқи дастнавис

ТДУ: 546.123.7+541.015.32.6

ТКБ: 24.1+24.5

Ж - 88



ЖУМАЕВ МАЪРУФЖОН ТАҒОЙМУРОТОВИЧ

**ПОЛИТЕРМАИ КОМПЛЕКСИ ФАЗАГӢ ВА ҲАЛШАВАНДАГИИ
СИСТЕМАИ ОБӢ-НАМАКИИ СУЛФАТҲО, КАРБОНАТҲО,
ГИДРОКАРБОНАТҲОИ НАТРИЙ ВА КАЛСИЙ**

АВТОРЕФЕРАТИ

диссертатсия барои дарёфти дараҷаи илмӣ
доктори илмҳои химия аз рӯйи ихтисосҳои
1.4.2. Химияи ғайриорганикӣ ва 1.4.5. Химияи физикӣ

Душанбе - 2026

Диссертатсия дар кафедраи химияи умумӣ ва ғайриорганикии Донишгоҳи давлатии омӯзгории Тоҷикистон ба номи Садриддин Айни иҷро карда шудааст.

Мушовирони илмӣ:

Солиев Лутфулло, Арбоби илм ва техникаи Тоҷикистон, доктори илмҳои химия, профессор, профессори кафедраи химияи умумӣ ва ғайриорганикии Донишгоҳи давлатии омӯзгории Тоҷикистон ба номи Садриддин Айни;

Раҳимова Мубаширхон, доктори илмҳои химия, профессор, профессори кафедраи физикӣ ва коллоидии Донишгоҳи миллии Тоҷикистон.

Муқарризони расмӣ:

Бадалов Абдулхайр, доктори илмҳои химия, профессор, узви вобастаи АМИТ, профессори кафедраи химияи умумӣ ва ғайриорганикии Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ;

Абулхаев Владимир Чалолович, доктори илмҳои химия, профессор, мудири озмоишгоҳи химияи пайвастагиҳои гетеросиклии Институти кимиё ба номи В.И. Никитини АМИТ;

Мирзозода Баҳодур, доктори илмҳои техникӣ, профессор, сарҳодими илмӣ шуъбаи илм, инноватсия, муносибатҳои байналхалқӣ ва маҷалланигории филиали Донишгоҳи давлатии Москва ба номи М.В. Ломоносов дар шаҳри Душанбе.

Муассисаи пешбар:

Донишгоҳи (Славянии) Россия ва Тоҷикистон

Ҳимояи диссертатсия «___» _____ соли 2026, соати 13:00 дар маҷлиси шурои диссертатсионии 6D.KOA-010 назди Донишгоҳи миллии Тоҷикистон баргузор мегардад.

Суроға: 734025, ш.Душанбе, хиёбони Рӯдакӣ, 17 Донишгоҳи миллии Тоҷикистон, бинои асосӣ, толори шурои диссертатсионӣ, ошёнаи дуюм, **Е.мил:** nazira64@bk.ru, **телефон:** (+992) 935476644, **факс:** (992-37) 2217711.

Бо диссертатсия дар китобхонаи Донишгоҳи миллии Тоҷикистон ва сомонаи www.tnu.tj шинос шудан мумкин аст.

Автореферат «___» _____ соли 2026 фиристода шудааст.

Котиби илмӣ
шурои диссертатсионӣ, н.и.х., дотсент



Бекназарова Н.С.

Муқаддима

Мубрамии мавзуи таҳқиқот. Дастовардҳои асосҳои таҳлили физико-химиявӣ дар соҳаҳои химияи ғайриорганикӣ ва химияи физикӣ, хусусан омӯзиши системаҳои металлӣ, оксидӣ ва намакӣ дар маҷмӯъ хуб эътироф шудаанд. Бо вуҷуди ин, аксари қорҳо ба системаҳои тааллуқдоранд, ки на бештар аз чор компонентро дар бар мегиранд. Ин бисёртар ба мушкилоти ифодаҳои геометрии усулҳои тасвир, сохтани диаграммаҳои комплексҳои фазагӣ (ДФ) ва муайян кардани фазаҳои саҳти мувозинатӣ дар системаҳои бисёркомпонента (СБК) алоқаманд мебошад.

Аҳамияти асосҳои таҳлили физико-химиявии СБК дар робита бо мушкилоти қорқарди ашёи хоми табиӣ ва техникаи полиминералӣ беш аз пеш меафзояд. Мушкилоти муҳимтарини таҳлили физико-химиявӣ ин бунёди шароити оптималии қорқарди ашёи хоми табиӣ ва партовҳои истеҳсолӣ, аз ҷумла партовҳои моеъи пайвастҳои химиявӣ мебошад. Равандҳои қорқарди гидрометаллургӣ ва галургии ҷунин ашёи хом бо қонуниятҳои мувозинатҳои фазагӣ (МФ) муайян карда мешаванд, ки барои системаи панҷкомпонентаи обӣ-намакии аз сульфатҳо, карбонатҳо, гидрокарбонатҳои натрийю калсий иборат буда ва аксар зерсистемаҳои он хосанд.

Яке аз объектҳои таҳқиқотии асосии саноатӣ дар ҳудуди Ҷумҳурии Тоҷикистон заводи «Алюминийи Тоҷик» аст. Партовҳои он майдонҳои ғоиданокро бекор ва муҳити зистро вайрон мекунад. Ҳол он ки дар таркиби партовҳои мазкур мавҷудияти моддаҳои зарурӣ, ба монанди: фторидҳо, сульфатҳо, карбонатҳо, гидрокарбонатҳои натрий, калий, калсий ва алюминий мушоҳида шуда, донишмандони қонуниятҳои комплекси фазагӣ имконияти қорқарди дубораи онҳоро ба вуҷуд оварда метавонанд.

Бинобар ин, муайянкунии политермаи комплекси фазагӣ дар системаи бисёркомпонентаи Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, CO_3^{2-} , HCO_3^- - H_2O дар фосилаи ҳароратҳои $0-100^\circ\text{C}$ илочи шароитҳои оптималии аз нав қорқарди партовҳои моеъи саноатиро, ки таркибан сульфатҳо, карбонатҳо, гидрокарбонатҳои натрий ва калсийдоранд, ба амал меорад.

Дарачаи қорқарди илмӣ проблемаи мавриди омӯзиш. Асосҳои таҳлили физико-химиявӣ (АТФХ), 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, А. Ваҳобов, Т.Дж. Джураев, И.Н. Ғаниев ва дигарон мебошанд.

Олимони номбурда таҳқиқотҳои илмиашонро асосан дар системаҳои химиявии металлӣ, оксидӣ, намакӣ вобаста ба ҳарорати ғудозиш амалӣ намудаанд. Омӯзиши изотермаи мувозинатҳои фазагӣ ва ҳалшавандагӣ дар системаҳои химиявии обӣ-намакӣ аз ҷониби Я.Г. Горошенко, Л.С. Солиев, И.К. Минков, Р.М. Чих, Б.И. Лушенко, Я.А. Дран, Г.С. Гулевич, И.Д. Караванский, С.И. Пришляк, А.Б. Мазуркевич ба роҳ монда шудааст. Онҳо дар ин самт муайянсозии мувозинатҳои фазагӣ ва ҳалшавандагӣ дар системаи бисёркомпонентаи обӣ-намакии Na , K , Mg , $\text{Ca} \parallel \text{SO}_4$, $\text{Cl-H}_2\text{O}$ «системаи баҳрӣ» барои фосилаи ҳароратҳои $0-100^\circ\text{C}$ дар сатҳи панҷкомпонентагӣ ва ҳудуди майдонҳои кристаллизатсияҳои алоҳидаи он дар сатҳи шашкомпонентагӣ иҷро намуда, диаграммаҳои фазагии системаи мазкур ва ҳалшавандагии зерсистемаҳои онро ташкилкунандаро сохта, фрагментатсия (сигментатсия)-и фазаҳои алоҳидаро ба анҷом расонидаанд. Аммо, дар зимни таҳлили адабиёт маълум гардид, ки политермаи системаи панҷкомпонентаи Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, CO_3^{2-} , HCO_3^- - H_2O аз ҷониби муҳаққиқон умуман омӯхта нашуда, диаграммаи комплекси фазагӣ, ҳолатӣ ва политермиашон сохта нашудаанд. Ҳалшавандагии баъзе субсистемаҳои СБК-ро ташкилдиханда қисман омӯхта шуда бошанд ҳам, вале диаграммаи ҳалшавандагиашон сохта нашудааст.

Робитаи таҳқиқот бо барномаҳо (лоиҳаҳо), мавзуҳои илмӣ. Таҳқиқоти диссертатсионии мазкур имконияти ҳалли вазифаҳои ҳадафи ҷоруми стратегияи миллиро оиди рушди саноати химиявӣ, пажӯҳиш ва қорқарди ашёи хоми маҳаллӣ ва партовҳои саноатӣ зоҳир менамояд. Дар доираи иҷрои барномаи болозикр иҷрои диссертатсия вобаста ба мавзуҳои илмӣ-таҳқиқотии фармоишии зерин гузаронида

шуданд: «Муайянсозии мувозинатҳои фазагӣ дар системаи бисёркомпонентаи сулфатҳо, карбонатҳо, гидрокарбонатҳо, фторидҳои натрий ва калсий» (солҳои 2014-2019, рақами қайди давлатӣ 0114TJ00343); «Ҳалшавандагӣ ва кристаллизатсияи намакҳо дар системаи бисёркомпонентаи аз сулфатҳо, карбонатҳо, гидрокарбонатҳо, фторидҳои натрий, калий ва калсий ташкилёфта» (солҳои 2019-2023, рақами қайди давлатӣ 0119TJ00957) ва «Изотермаи фазаҳосилшавӣ ва ҳалшавандагии намакҳо дар системаи бисёркомпонентаи Na^+ , K^+ , $\text{Al}^{3+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, CO_3^{2-} , F^- - H_2O барои 273 ва 298 K».

ТАВСИФИ УМУМИИ ТАҲҚИҚОТ

Мақсади таҳқиқот ин мукаммалкунии усули пешгӯии политермаи комплекси фазагӣ дар системаи бисёркомпонентаи обӣ-намакии иборат аз катионҳои натрий, калсий, анионҳои сулфат, карбонат, гидрокарбонат, сохтани диаграммаҳои комплекси фазагӣ, омӯзиши ҳалшавандагӣ дар нуқтаҳои нонварианти ва истифодаи маълумоти бадастомада барои ҳалли масъалаҳои амалии технологӣ мебошад.

Вазифаи таҳқиқот:

- тақмили усулҳои муайянкунии политермии комплекси фазагӣ дар эксперименталӣ омӯзиши системаҳои бисёркомпонентаи обӣ-намакӣ;
- тақмили усулҳои сохтани диаграммаҳои политермии комплекси фазагӣ ва ҳалшавандагии СБК;
- таҳқиқи мушаххаси комплексҳои фазагӣ дар системаҳои бисёркомпонентаи обӣ-намакии сулфатҳо, карбонатҳо, гидрокарбонатҳои натрий ва калсий;
- истифодаи маълумоти бадастомада оиди комплексҳои фазагӣ дар системаи бисёркомпонентаи обӣ-намакии таҳқиқшуда дар омӯзиши роҳҳои кристаллизатсияи маҳлулҳои технологӣ ва таҳияи шароитҳои оптималии коркарди галургии маъданҳои полиминералӣ ва коркарди ашёи хоми техникии партовҳои моеъи истеҳсоли алюминий;
- аз рӯйи натиҷаҳои муайянкунии эксперименталии ҳалшавандагӣ, сохтани диаграммаҳои ҳолатӣ (диаграммаҳои ҳалшавандагӣ)-и зерсистемаҳо ва системаи панҷкомпонентаи обӣ-намакӣ (катиони металлӣ ишқорӣ натрийю металлӣ ишқорзаминӣ калсий бо анионҳои мувофиқи номбурда) ва зерсистемаҳои бавучудорандаи системаи панҷкомпонента;
- ҳудуди майдонҳои алоҳида фрагментатсияи диаграммаҳои сохташуда вобаста ба кристаллизатсияи фазаҳои ҳолиси дивариантии системаҳои чоркомпонента ва кристаллизатсияи хатҳои моновариантии яқояи ду фазаи системаи панҷкомпонента;
- таҳияи схемаҳои принципалии технологӣ тарзҳои ҷудокунӣ фазаҳои саҳти алоҳида дар асоси диаграммаҳои комплекси фазавӣ ва ҳолатӣ (ҳалшавандагии) зерсистемаҳои системаи бисёркомпонентаи химиявӣ таҳқиқшаванда.

Объекти таҳқиқот. Системаи бисёркомпонентаи Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, CO_3^{2-} , HCO_3^- - H_2O , субсистемаҳои компонентнокиашон чори $\text{Na}^+ \parallel \text{SO}_4^{2-}$, CO_3^{2-} , HCO_3^- - H_2O ; $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, CO_3^{2-} , HCO_3^- - H_2O ; Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, CO_3^{2-} - H_2O ; Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, HCO_3^- - H_2O ; Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{CO}_3^{2-}$, HCO_3^- - H_2O ва системаҳои секомпонентаи: $\text{Na}^+ \parallel \text{SO}_4^{2-}$, CO_3^{2-} - H_2O ; $\text{Na}^+ \parallel \text{SO}_4^{2-}$, HCO_3^- - H_2O ; $\text{Na}^+ \parallel \text{CO}_3^{2-}$, HCO_3^- - H_2O ; $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, CO_3^{2-} - H_2O ; $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, HCO_3^- - H_2O ; $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{CO}_3^{2-}$, HCO_3^- - H_2O ; Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$ - H_2O ; Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{CO}_3^{2-}$ - H_2O ; Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{HCO}_3^-$ - H_2O мебошанд.

Мавзуи (предмет) таҳқиқот. Политермаи комплекси фазагӣ ва ҳалшавандагии системаи обӣ-намакии сулфатҳо, карбонатҳо, гидрокарбонатҳои натрий ва калсий мебошад.

Навгонии илмӣ таҳқиқот:

- усули пешгӯии политермии комплексҳои фазагӣ дар СБК тақмил дода шудааст, ки он ба интиқоли элементҳои сохтори системаҳои иборат аз n компонента ба ҳудуди системаи умумӣ иборат аз $(n + 1)$ компонента асос ёфтааст;
- усули сохтани диаграммаҳои комплексҳои фазагии СБК чунин тақмил дода шудааст, ки дар он ҳамаи комплексҳои фазагии имконпазир дар шаклҳои геометрӣ ва ҷойгиршавии яқояи онҳо инъикоси ҳудро меёбанд;

- бо усули такмилдодашудаи назариявӣ, моделонии графикаи пешгӯйии политермаи комплекси фазагии системаҳои бисёркомпонента ҳамаи мувозинатҳои фазагии имконпазир дар 25 изотермаи системаҳои чоркомпонента ва 5 изотермаи системаҳои панҷкомпонентаи сулфатҳо, карбонатҳо, гидрокарбонатҳои натрий ва калсий ба таври назариявӣ муайян карда шуда, диаграммаҳои изотермаҳои пурраи комплекси фазагии системаҳои таҳқиқшуда сохта шудаанд;

- хусусиятҳои сохтори диаграммаҳои системаҳои бисёркомпонентаи обӣ-намакӣ муайян карда шудаанд, ки шароити тадқиқи амалии фазаҳосилшавиро дар онҳо тавсиф мекунанд;

- роҳҳои кристаллизатсия дар системаи иборат аз анионҳои сулфатҳо, карбонатҳо, гидрокарбонатҳо ва катионҳои натрийю калсий дар ҳудуди ба маҳлули таркиби технологӣ наздик омӯхта шуда, қонуниятҳои кристаллизатсия ва ҳалшавандагии афзалияти намакҳои натрий-калсий муайян карда шудаанд;

- фрагментатсияи диаграммаҳои сохташуда аз рӯи ҳудудҳои кристаллизатсияи фазаҳои алоҳида (барои системаҳои чоркомпонента) ва кристаллизатсияи якҷояи ду фаза (барои системаи панҷкомпонента) пурра муайян карда шудаанд;

- схемаҳои принципалии технологияи тарзҳои ҷудокунии фазаҳои саҳти алоҳида дар асоси диаграммаҳои комплекси фазаӣ ва ҳолатии (ҳалшавандагии) зерсистемаҳои системаи бисёркомпонентаи химиявии таҳқиқшаванда таҳия карда шуда, тарзҳои мушаххаси ҷудокунии фазаҳои алоҳида аз партовҳои моеъи саноатӣ пешниҳод карда шудаанд.

Нуктаҳои ба ҳимоя пешниҳодшаванда:

- таҳқиқи усули такмилдодашудаи пешгӯии политермии комплексҳои фазагӣ дар СБК, ки он ба интиқоли элементҳои сохтори системаҳои иборат аз n компонента ба ҳудуди системаи умумии иборат аз $(n + 1)$ компонента аз ҳисоби концентратсия дар изотерма ва аз ҳисоби параметрҳои система барои политерма асос ёфтааст;

- пешниҳоди усули нави муайянкунӣ ва сохтани диаграммаҳои комплексҳои фазагии СБК, ки дар он ҳамаи мувозинатҳои фазагии имконпазир дар шаклҳои геометрӣ ва ҷойгиршавии якҷояи онҳо инъикоси ҳудро меёбанд;

- омӯзиши ҳамаи политермаҳои мувозинатҳои фазагии имконпазир дар 25 изотермаи системаҳои чоркомпонента ва 5 изотермаи системаҳои панҷкомпонентаи сулфатҳо, карбонатҳо, гидрокарбонатҳои натрий, калсий ва таҳқиқи пурраи комплекси фазагии системаҳои болозикр;

- муайянкунии хусусиятҳои сохтори диаграммаҳои системаҳои бисёркомпонентаи обӣ-намакӣ, ки шароити тадқиқи амалии фазаҳосилшавиро дар онҳо тавсиф мекунанд;

- таҳқиқи роҳҳои кристаллизатсия дар системаи иборат аз сулфатҳо, карбонатҳо, гидрокарбонатҳои натрий ва калсий дар ҳудудҳои ба таркиби маҳлули технологӣ наздик ва муайянсозии қонуниятҳои кристаллизатсия ва ҳалшавандагии афзалияти намакҳои натрий-калсий;

- фрагментатсияи пурраи диаграммаҳои сохташуда аз рӯи ҳудудҳои кристаллизатсияи майдонҳои дивариантии фазаҳои алоҳида дар сатҳи чоркомпонентаи таркиб ва кристаллизатсияи якҷояи хатҳои моновариантии ду фаза дар сатҳи таркиби панҷкомпонентаи системаи омӯхташаванда;

- коркард ва пешниҳоди тарзҳои нави ҷудокунии фазаҳои алоҳида бо таҳияи схемаи нави принципалии технологӣ дар асоси диаграммаҳои комплекси фазагӣ ва ҳалшавандагии зерсистемаҳои системаи бисёркомпонентаи химиявии таҳқиқшаванда аз партовҳои моеъи саноатӣ.

Аҳамияти назариявӣ ва илмӣ амалии таҳқиқот:

- усули коркардшудаи пешгӯии комплексҳои фазагӣ дар СБК имкон медиҳад, ки раванди омӯзиши таҷрибавии объектҳои мураккаби табиӣ ва технологӣ ба таври назаррас пурзӯр карда шавад;

- усулҳои коркардшудаи сохтани диаграммаҳои комплексҳои фазагӣ имкон медиҳанд, ки сохтори муфассали СБК нишон дода шавад ва роҳҳои имконпазири

кристаллизатсия дар ҳама сатҳҳои вариантнокӣ пешгӯӣ карда шаванд (дар асоси қоидаи фазаҳои Гиббс);

- қонуниятҳои муқарраршудаи кристаллизатсия ва ҳалшавии намакҳои натрий-калсий имкон медиҳад, ки ин равандро ҳангоми ҳалли масъалаҳои ба даст овардани фазаҳои сахти алоҳидаи мақсаднок аз системаҳои бисёркомпонентии обӣ-намакӣ идора карда шаванд;

- маводди таҳқиқотҳои анҷомёфта метавонанд дар курсҳои махсус оид ба таҳлили физико-химиявӣ ва мувозинатҳои гетерогенӣ дар институтҳои илмӣ-таҳқиқотӣ, мактабҳои олии истифода шаванд.

Муқаррароти пешниҳодшуда оид ба таҳқиқотҳои анҷомёфта як самти нави илмӣ умедбахшро дар асосҳои таҳлили физико-химиявӣ ташкил медиҳад, ки он пешгӯии фазаҳосилшавиро дар СБК, ки ба интиқоли шаклҳои геометрии сохтори системаҳои ҷузъӣ ба ҳудуди системаи умумӣ ва сохтани диаграммаҳои комплексҳои фазагӣ ва ҳалшавандагӣ дар ҳамворӣ асос мегузорад. Ин имкон медиҳад, ки равандро омӯзиши таҷрибавии объектҳои мураккаби табиӣ ва техникӣ қавӣ шуда ва дар асоси диаграммаҳо технологияҳои нави коркарди ашёи хоми полиминералӣ бунёд гарданд.

Дараҷаи эътимоднокии натиҷаҳо. Эътимоднок будани натиҷаҳои илмӣ ба даст омадаро усулҳои ҳозиразамони таҳлили физико-химиявӣ, апрабатсияи онҳо дар форум, симпозиум, конференсияҳои сатҳҳои Байналхалқӣ Ҷумҳуриявӣ ва нашри мавод дар маҷаллаҳои илмӣ таҳассусӣ тавсиянамудаи КОА ҶТ ва дигар журналҳои илмӣ профилӣ тасдиқ ва асоснок менамоянд.

Мутобиқати диссертатсия ба шиносномаи ихтисоси илмӣ. Соҳаи таҳқиқ ба шиносномаҳои ихтисосҳои илмӣ химияи ғайриорганикӣ ва химияи физикӣ аз рӯи бандҳои зерин мувофиқат мекунад.

1.4.2. Химияи ғайриорганикӣ. Банди 1. Муайянкунии характери боҳамалоқамандии байни таркиб, сохт ва хосияти пайвастиҳои ғайриорганикӣ (боби II). Банди 2. Коркарди усулҳои омӯзиши пайвастиҳои ғайриорганикӣ (боби III). Банди 3. Тарзи ҳосилкунӣ ва омӯзиши структура ва хосияти мавод дар асоси пайвастиҳои ғайриорганикӣ (боби V). Банди 4. Омӯзиши табдилоти химиявӣ ва структуравӣ-фазавӣ пайвастиҳои ғайриорганикӣ дар зери таъсири муҳталиф (боби IV).

1.4.5. Химияи физикӣ. Банди 3. Назарияи маҳлулҳо, таъсири мутақобилаи байнимолекулавӣ ва байнизарравӣ (бобҳои II-V). Банди 5. Таҳқиқи қонуниятҳои равандро тағйирёбии структура ва таркиби системаҳои химиявӣ дар шароити майдони беруна, ҳароратҳо ва фишорҳо, таъсири якҷояи физикӣ ва физико-химиявӣ (боби III). Банди 6. Асосҳои физико-химиявии равандро технологияи химиявӣ (боби V).

Саҳми шахсии доктараи дараҷаи илмӣ дар таҳқиқот ин тартиб додани ҳадафҳои таҳқиқот, ҷамъоварӣ, коркард, таҳлил ва интишороти илмӣ, муайянкунии усулҳое, ки тавассути онҳо масъалаҳои гузашташуда роҳи ҳалли худро меёбанд, васли таҷҳизотҳои таҷрибавӣ, гузаронидани таҷрибаҳо дар ҳамаи марҳилаҳои омӯзиш, коркарди ҳулоса, маълумоти таҷрибавӣ ва ҳисобҳои он мебошанд.

Тасвир ва амалисозии натиҷаҳои диссертатсия. Натиҷаҳои асосӣ ва муҳимтарини иҷрои таҳқиқоти диссертатсионӣ мазкур дар: конференсияҳои ҷаролаи илмӣ-назариявии ҳайати профессорон ва омӯзгорони ДДОТ ба номи С. Айни (Душанбе, 2010-2025); конференсияи Байналхалқӣ 60-солагии Академияи илмҳои Тоҷикистон (Душанбе, 2011); конференсияи Ҷумҳуриявии «Комплексообразование в растворах» (Душанбе, 2012); VI конференсияи Байналхалқӣ «Современные проблемы физической химии» (Донецк, 2013); конференсияи Байналхалқӣ «Экологобезопасные и ресурсосберегающие технологии и материалы» (Улан-Уде, 2014); VII конференсияи илмӣ-амалии «European Science and Technology» (Мюнхен, Германия, 2014); конференсияи илмӣ Байналхалқӣ «Теплофизические исследования и измерения при контроле качества веществ, материалов и изделий» (Душанбе-Тамбов, 2014); конференсияи Байналхалқӣ «Экологобезопасные и ресурсосберегающие технологии и материалы» (Улан-Уде, 2015); III конференсияи Байналхалқӣ «Global Science and Innovation» (Chicago, USA, 2014); VI конференсияи илмӣ-амалии «Современные тенденции развития науки и технологии» (Белгород, 2015);

конференсияи илмӣ-амалии «Научные исследования и разработки в эпоху глобализации» (Киров, 2016); II конференсияи умумироссиягии олимони ҷавон бо иштироки Байналхалқии «Достижения химии в агропромышленном комплексе» (Уфа, 2016); XI хониши Курнаковии таҳлили физико-химиявӣ ҳамчун XX съезди Менделеевӣ аз химияи умумӣ ва тадқиқӣ (Воронеж, 2016); конференсияи Байналхалқии «Термический анализ и калориметрии» (Санкт-Петербург, 2016); «II Байкальском материаловедческом форуме» (Улан-Уде, 2017); «III Байкальском материаловедческом форуме» (Улан-Уде, 2018); «XXI Менделеевском съезде по общей и прикладной химии» (Санкт-Петербург, 2019); конференсияи илмӣ Байналхалқии «Вопросы физической и координационной химии» (Душанбе, 2019); XV хонишҳои Нуъмоновии «Современное состояние химической науки и использование её достижений в народном хозяйстве Республики Таджикистан» (Душанбе, 2019); конференсияи Байналхалқии илмӣ-амалии «Фундаментальные и прикладные исследования в науке и образовании» (Стерлитамак, 2020); конференсияи илмӣ-амалии Ҷумҳуриявии «Современное состояние и перспективы физико-химического анализа» (Душанбе, 2021); Симпозиуми умумироссиягии олимони ҷавон бо иштироки Байналхалқӣ «Физико-химические методы в междисциплинарных экологических исследованиях» (Москва, 2021); конференсияи Байналхалқӣ «Современные проблемы металлургической промышленности» (Душанбе, 2021); «IV-Байкальском материаловедческом форуме» (Улан-Уде, 2022); конференсияи илмӣ-амалии Ҷумҳуриявии «Современное состояние и перспективы физико-химического анализа» (Душанбе, 2023); симпозиуми умумироссиягӣ ва олимони ҷавони «Физико-химические методы в междисциплинарных исследованиях» (Севастополь, 2023); конференсияи илмӣ-амалии Байналхалқии «Развитие новых направлений в химии и химической технологии» (Душанбе, 2023); конференсияи Байналхалқии «Химическая наука и образование, проблемы и перспективы развития» (Махачкала, 2024); конференсияи илмӣ-амалии «Нақши химия ва саноати химиявӣ дар саноатикунонии Тоҷикистон» (Душанбе, 2024); IV конференсияи Байналхалқии «Вопросы физической и координационной химии» (Душанбе, 2024); «XXII Менделеевский съезд по общей и прикладной химии» (Сириус, 2024); XIX хонишҳои Нуъмоновӣ (Душанбе, 2024); конференсияи илмӣ-амалии Ҷумҳуриявии «Современное состояние и перспективы физико-химического анализа» (Душанбе, 2025); «IX Булатовские чтения» (Красноярск, 2025); конференсияи Байналхалқии «Комплексные соединения и аспекты их применения» (Душанбе, 2025); конференсияи Байналхалқии илмӣ-амалии «Актуальные проблемы современной химии, решения и перспективы развития» (Денов, 2025); «V-Байкальском материаловедческом форуме» (Улан-Уде, 2025); конференсияи Байналхалқии «Пайвастҳои комплекси ва ҷанбаҳои истифодабарии онҳо» (Душанбе, 2025) ва XX хонишҳои Нуъмоновӣ (Душанбе, 2025) муҳокимаи гардида, аз апробатсия гузаштаанд.

Интишорот аз рӯйи мавзӯи диссертатсия. Дар асоси кори диссертатсионӣ 118 маводди илмӣ нашр шудааст, аз ин теъдод: 3 монография, 3 нахустпатент, 73 мақола дар маҷаллаҳои тавсиянамудаи тақризшавандаи Комиссияи олии аттестатсионии назди Президенти Ҷумҳурии Тоҷикистон, Федератсияи Россия ва дигар маҷаллаҳои пойгоҳи байналхалқӣ, 39 фишурдаи мақолаҳо дар маводди форум, симпозиум ва конференсияҳои байналхалқӣ ва ҷумҳуриявӣ.

Соҳтор ва ҳаҷми диссертатсия. Диссертатсия аз муқаддима, 5 боб, 364 саҳифаи ҷопи компютерӣ, 123 расм, 91 ҷадвал, ҳулосаҳои умумӣ, тавсия ва замимаҳои иборат аст.

МУНДАРИҶАИ АСОСИИ ТАҲҚИКОТ

Дар муқаддима мубрамиат ва зарурат бо аҳамияти мавзӯи таҳқиқоти диссертатсионӣ дарҷ гардида, ҳадаф ва вазифаҳои он муайян гардида, аҳамияти илмӣ-назариявӣ ва амалӣ инъикоси худро ёфтааст.

Боби якум таҳқиқоти диссертатсионӣ ба шарҳи мухтасари адабиёт оид ба асосҳои назариявии усулҳои таҳқиқи системаҳои бисёркомпонентаи муовизаи намакӣ, аз ҷумла: усули матритсавӣ тасвир намудани системаҳои бисёркомпонентаи намакӣ;

усулҳои триангулятсияи диаграммаҳои системаҳои бисёркомпонентаи муовиза; усули конверсионии таҳқиқи системаҳои бисёркомпонента; муайянкунии комплекси фазагии системаҳои химиявӣ бо усули транслятсия; омӯзиши политермаи комплекси фазагии системаҳои химиявӣ ва ҳолати омӯзиши политермаи системаи панҷкомпонентаи Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, CO_3^{2-} , HCO_3^- - H_2O чамъоварӣ гардидааст.

Боби дуюми диссертатсия фарогири натиҷаҳои политермаи комплекси фазагии системаи Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, CO_3^{2-} , HCO_3^- - H_2O дар сатҳи таркиби чоркомпонента буда, дар он зерсистемаҳои секомпонента ва чоркомпонентаи системаи болозикр омӯхта шуда, диаграммаи комплекси фазагиашон сохта шудааст.

Дар **боби сеюм** натиҷаҳои омӯзиши политермаи сохтори комплекси фазагии системаи Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, CO_3^{2-} , HCO_3^- - H_2O дар сатҳи таркиби панҷкомпонента бо фрагментатсияи фазаҳои саҳти алоҳидаашон оварда шудааст.

Боби чор. Политермаи ҳалшавандагии системаи Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, CO_3^{2-} , HCO_3^- - H_2O ва зерсистемаҳои $5\text{Na}^+ \cdot \text{SO}_4^{2-} \cdot \text{CO}_3^{2-} \cdot \text{HCO}_3^- \cdot \text{H}_2\text{O}$; $3\text{Ca}^{2+} \cdot \text{SO}_4^{2-} \cdot \text{CO}_3^{2-} \cdot 2\text{HCO}_3^- \cdot \text{H}_2\text{O}$; Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, CO_3^{2-} - H_2O ; Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, HCO_3^- - H_2O ; Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{CO}_3^{2-}$, HCO_3^- - H_2O , ки қисми таркибии он мебошанд пурра таҳқиқ гардида, диаграммаи ҳалшавандагиашон сохта шуда, координати шаклҳои геометрӣ дар он муайян карда шудааст ва ҳамзамон натиҷаҳои онҳо дар боби чорум инъикос карда шудааст.

Боби панҷуми таҳқиқоти диссертатсионӣ характери тадбиқи дошта, дар он маълумот оид ба параметрҳои концентратсионии фазаҳои саҳти мувозинатӣ дар системаи Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, CO_3^{2-} , HCO_3^- - H_2O асоси коркарди партовҳои моеъи истехсоли алюминий, мувозинати дивариантӣ, мувозинати моновариантӣ ва мувозинати нонвариантӣ дар системаи бисёркомпонентаи таҳқиқшаванда оварда шуда, диаграммаи ҳолатии системаи бисёркомпонентаи объекти асосии таҳқиқот сохта шудааст. Дар асоси диаграммаи сохташуда тарзҳои ҷудокунии фазаҳои саҳти майдонҳои дивариантӣ оварда шудааст.

Диссертатсия бо хулосаҳои умумӣ, тавсияҳои пешниҳодшуда оид ба тадбиқи амалии маълумотҳои аз ҷониби муаллиф пешниҳодшуда, инчунин, рӯйхати адабиёти истифодагардида ва замимаҳо чамъбаст мегардад.

Дар таҳқиқоти диссертатсионӣ ихтисораҳо ва аломатҳои шартии зерин қабул шудаанд: Mb - мирабилит $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$; CaH - гидрокарбонати калсий $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$; Gb - глауберит $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot \text{CaSO}_4$; Gr - гипс $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$; Nk - нахколит NaHCO_3 ; Tr - трона $\text{NaHCO}_3 \cdot \text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$; Gl - гейлюссит $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{CaCO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$; Cc - калсит CaCO_3 ; Na·10 - декагидрати карбонати натрий $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$; Na·1 - моногидрати карбонати натрий $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$; Te - тенардит Na_2SO_4 ; Pr - пирсонит $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{CaCO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$; Br - беркеит - $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{Na}_2\text{SO}_4$; 5C·Na·3 – $5\text{CaSO}_4 \cdot \text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$; 3Na·C – $3\text{NaHCO}_3 \cdot \text{Na}_2\text{CO}_3$; E – нуктаи нонвариантӣ; СБК - системаҳои бисёркомпонента; СП - системаи панҷкомпонента; СЧ - системаи чоркомпонента; ТДТ - таҳлили диференсиалии термикӣ; ТПС - триангулятсияи политоҳои система; МФ - мувозинатҳои фазагӣ; КФ - комплекси фазагӣ; АТФХ - асосҳои таҳлили физико-химиявӣ.

Муайянсозии политермаи комплекси фазагии системаҳои химиявӣ ва ҳолати омӯзиши политермаи системаи панҷкомпонентаи Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, CO_3^{2-} , HCO_3^- - H_2O

Тасвири диаграммаҳои системаҳои муовизаи обӣ-намакӣ бо якчанд усул амалӣ кунонида мешавад. Масалан, дар вақти истифодаи усули Левенгерс концентратсияи моддаҳо бо адади мол – эквивалентҳо, ки ба 100 мол (ё 1000,) об рост меояд ифода карда шуда, ба сифати тири координата 4 тегаи полуоктаэдр, ки дар як қулла якҷо мешаванд, қабул карда мешавад.

Тасвири системаҳои чоркомпонентаи муовиза бо усули Иенекс бо истифодабарии квадрати таркиби намакӣ асоснок кунонида шудааст, ки перпендикуляр ба он микдори молҳои об дар 100 мол массаи намак ишора мешаванд.

Яке аз усулҳои аввалин барои тасвири графикии системаҳои панҷкомпонента аз тарафи Буке – Скоуте пешниҳод гаштааст. Мувофиқи ин усул концентратсияи ҳамаи

компонентҳои система ҳамчун координатаи як нукта дар фазои чорченака қабул карда шудааст, ки ин нукта дар ҳамвории тетраэдр акс кунонида мешавад.

Дар тасвири графикаи системаҳои бисёркомпонента корҳои Радишев мавқеи махсусро ишғол мекунанд. Олими болозикр барои тасвири графикаи системаҳои бисёркомпонента (асосан муовиза) истифодабарии фигураҳои геометрии бисёрченакаро (политопҳоро) пешниҳод намудааст.

Чунин усул бо баъзе иловаҳо аз тарафи Перелман низ пешкаш шудааст, ки дар он барои ин мақсад фигураҳои бисёрченакаи «нодуруст» истифода бурда мешаванд.

Вант-Гофф барои тасвири графикаи системаи панҷкомпонентаи Na , K , Mg // SO_4 , Cl - H_2O , ки ҳамчун «системаи баҳрӣ» маълум аст ва нисбат ба хлориди натрий (NaCl) сершуда аст, усули шаклдодашудаи Левенгертсро истифода бурдааст. Дар ин варианти такмилдодашуда консентратсияи хлориди натрий дар диаграмма нишон дода намешавад. Ҳамзамон, мутобиқ ба реаксияҳои муовизаи дар система ҷой дошта, адади молҳои сульфати натрий ҳамчун тири баробарқимати ду вектора (сульфат ва хлориди магний) истифода бурда мешавад.

Усули матритсавӣ тасвир намудани системаҳои бисёркомпонентаи намакӣ тасвири диаграммаҳои таркибии системаҳои муовизаи бисёркомпонента чадвал-матритсаҳо буда, дар онҳо муносибатҳои термодинамикӣ ва химиявӣ ҷойгир карда шудаанд. Чунин чадвал матритсаҳо миқдори реаксияҳои муовизаи химиявиро вобаста ба қисмҳои таркиби муайян карда, алоқамандии байни компонентҳоро вобаста ба ҳосиятҳои топологӣ пурра шарҳ дода наметавонад.

Харви бо ҳамкорунаш дар асоси бузургии потенциалии термодинамикӣ ассотсиатҳои фазагиро барои нуктаҳои нонвариантии системаи шашкомпонентаи Na , K , Mg , Ca // SO_4 , Cl - H_2O барои ҳарорати 25°C ҳисоб кардааст. Дар ин ҳолат устувории комбинатсияҳои ҳосилшудаи фазаҳои сахт дар асоси бузургии энергияи Гиббс муайян карда шудааст. Самаранокии чунин ҳисобҳо аз дақиқии ҳисобҳои тағйирёбии энергияи Гиббс вобаста аст, ки ин дақиқӣ бо зиёдшавии компонентнокии система коста мешавад. Чи тавре, ки худӣ муаллифони қайд мекунанд натиҷаҳои боэътимодно танҳо барои системаҳои то чоркомпонента ба даст овардан мумкин. Бояд қайд кард, ки диаграммаҳои ҳолатии системаҳои бисёркомпонента бо кадом усуле, ки сохта нашаванд, бо сабаби бисёр будани элементҳои геометрияшон (нуктаҳои нонварианти, хатҳои моноварианти, майдонҳои диварианти) барои ҳисобҳои графикӣ номувофиқ мебошанд.

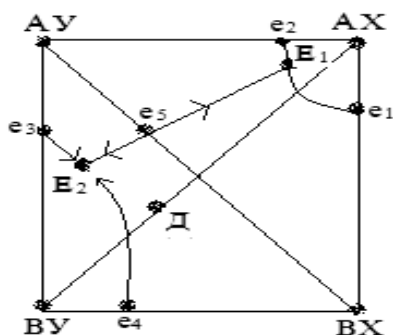
Олимон бо усули триангулятсияи диаграммаҳои таркибӣ политопҳои барҷастаи диаграммаҳои таркибии системаи $(n+1)$ - компонента муайян намуда бошанд ҳам, вале ин усул имкони мушаххас сохтани диаграммаҳоро наметавонад. Усули мазкур бо истифода аз алгоритм моделҳои диаграммаҳои системаҳои химиявиро пешниҳод мекунад ҳалос. Он мушаххас диаграммае, ки фарогири ҳамаи ҳосиятҳои физико-химиявӣ бошад, пешниҳод каарда наметавонад. Чуноне, ки қайд намудем усулҳои ананавии сохтани диаграммаҳои мувозинатҳои фазагӣ дар асоси ҳосиятҳои ҷеншавандашон барои таҳқиқи системаҳои бисёркомпонента номувофиқ мебошанд. Барои ин мақсад усули транслятсия бештар қобили қабул буда, он яке аз усулҳои универсалӣ мебошад. Он барои ҳамагуна шаклҳои системаҳои химиявӣ, ки 3 ва зиёда компонентҳо ташкил ёфтаанд, тадбиқшаванда мебошад.

Диаграммаҳои фазагӣ ва сатҳии системаҳое, ки дар онҳо танҳо намакҳои онҳоро ташкилдиханда кристаллизатсия мешаванд. Сохтани диаграммаҳои ҳолатии системаҳои секомпонентаи муовиза аз диаграммаҳои ҳолатиашон фарқ надоранд. Чунки дар ҳарду ҳолат дар тирҳои амудии шакли геометрии квадратӣ бузургии ба ҳарорат тааллуқдор ҷойгир гардида, аз онҳо дар асоси нуктаҳои ҳосилшуда хатҳои ҳамвори майдонҳоро ҷудокунада гузаронида мешаванд.

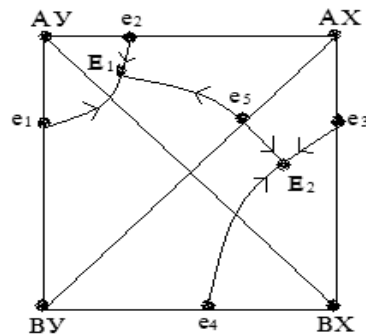
Бо ҳамин усул сохтани сатҳи диаграммаҳо дар якҷоягӣ бо ҳаҷмҳои байни онҳо диаграммаҳои фазагии системаи омӯхташавандаи химиявиро ташкил медиҳанд, ки аз рӯйи сохтори худ ба диаграммаҳои сохтории системаҳои секомпонентаи муқаррарӣ монанд мебошанд: аз боло онҳо бо сатҳи ликвидус ва аз поён бо солидус маҳдуд карда шудаанд. Сатҳи ликвидус метавонад ба

майдонҳои кристаллизатсияи якумини ин ё он фаза, пайвастиҳои дучанда ё маҳлулҳои саҳт тақсим шуда бошад. Байни сатҳи ликвидус ва солидус ҳаҷмҳои кристаллизатсияи якумин ва дуооин, ки аз якдигар ҷудо шудаанд, ҷойгир аст.

Диаграммаҳои сатҳии бо ин усул ҳосилшуда як қатор хосиятҳои геометрии диаграммаҳои системаҳои секомпонентии муқаррариро доро мебошанд: дар он қоидаҳои фашанг, маркази вазн, ҳатти рости пайвастикунандии Ван Рейн Алкемаде амал мекунанд. Дар ҷунин диаграммаҳо метавонанд нуқтаҳои нонвариантии эвтоникӣ ва эвтектикӣ ҷой дошта бошанд. Ҳатҳои сарҳадӣ метавонанд конгруэнтӣ ва инконгруэнтӣ бошанд. Роҳҳои кристаллизатсия монанди системаҳои секомпонентии муқаррарӣ муайян карда мешаванд.



Расми 1. – Диаграммаи ҳолатии муовизаи барнагарданда бо диагонали стабилӣ АХ-ВУ



Расми 2. – Диаграммаи ҳолатии муовизаи барнагарданда бо диагонали стабилӣ АУ-ВХ

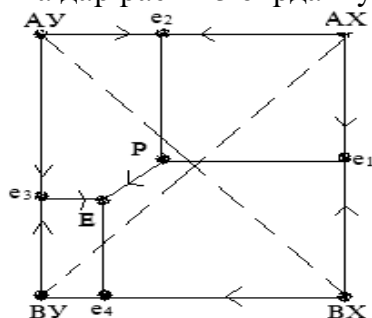
Дар расми 1 яке аз ҷунин диаграммаҳо нишон дода шудааст, ки дар он диагонали АУ-ВХ диаграммаро ба ду системаи муқаррарии секомпонента: ВХ-АУ-АХ ва ВХ-АУ-ВУ тақсим намудааст. Дар ҳар қадом диаграммаҳои ин системаҳои секомпонента ҳамаи элементҳои геометрии дахлдор мавҷуд мебошанд: эвтектикаи сечандаи E_1 бо сехатҳои сарҳадии E_1e_1 , E_1e_2 ва E_1e_5 барои системаи секомпонентии ВХ-АУ-АХ; эвтоникаи сечандаи E_2 бо сехатҳои сарҳадии E_2e_3 , E_2e_4 ва E_2e_5 - барои системаи секомпонентии ВХ-АУ-ВУ. Дар системаи секомпонентии аввала майдонҳои АУ e_2 E_1e_5 (барои компоненти АУ); АХ e_2 E_1e_1 (барои компоненти АХ) ва ВХ e_1 E_1e_5 (барои компоненти ВХ). Дар системаи секомпонентии дуоо майдонҳои ВУ e_3 E_2e_4 (барои компоненти ВУ); ВХ e_4 E_2e_5 (барои компоненти ВХ) ва АУ e_3 E_2e_5 (барои компоненти АУ) мавҷуданд. Майдонҳои компоненти АУ дар ҳарду система бо як майдон пайваст мешаванд. Ҳамин ҳолат барои майдони ВХ ҷой дорад ва ҳамин тавр дар диаграммаи овардашуда 4 майдони кристаллизатсия ҷой дорад.

Диагонали АУ-ВХ квадратӣ ном дорад. Дар системаҳои муовиза ҷунин диагоналҳо нуқтаҳоеро пайваст мекунанд, ки дар онҳо пайвастиҳо аз ғудохтаҳои омехтаҳои худ дар ҳолати ҳолис, ё дар шакли пайвасти ҳар ҷорашро дошта таҳшин мешаванд, яъне бе реаксияи муовиза. Ҳатҳои диагоналии стабилӣ ҳатти сарҳадии ду эвтоникаро пайвасткунандаро бурида нуқтаи зинагиро (e_3) ҳосил мекунанд, ки вай нуқтаи эвтектикии ин буриш ва максималии ҳатти қачи сарҳадӣ мебошад.

Ҳамин тавр диагонали стабилӣ ғуфта ҳатти буриши квазибинариро меноманд. Дар эвтоникаҳои сечандаи системаи дар расми 1 овардашуда омехтаи намакҳои АУ-ВХ-АХ (эвтектикаи E_1) ва ВУ+АУ+ВХ (эвтектикаи E_2) кристаллизатсия мешаванд. Ҷуфти намакҳое, ки дар таркиби маҳсулоти охирини саҳтшавии ғудохтаи эвтектикӣ ҳастанд ҷуфти стабилӣ номдоранд. Буриши дигар диагонал (АХ-ВУ) системаи дучандаро намедихад. Масалан, агар мо омехтаи ин ду намакро (нуқтаи Д) ғудохтаи ин ғудохтаро хунук намоем, онгоҳ дар кристаллизатсияи аввала на намаки АХ ва на намаки АУ-ро ҳосил накарда, балки намаки ВХ-ро ҳосил мекунем, ки вай маҳсулоти реаксияи боҳамтаъсиркунии АХ ва ВУ мебошад. Дар зинаи дуооми кристаллизатсия намакҳои ВХ+ВУ ва дар зинаи сеооми кристаллизатсия маҷмӯи намакҳои ВХ, ВУ ва АУ-ро, ки диагонали стабилро ташкил медиҳанд, ба даст меорем.

Дар расми 2 диаграммаи системаи секомпонентаи муовизаи А, В // X, У бо диагонали стабилӣ АХ-ВУ оварда шудааст, ки дар он мавқеи майдонҳои кристаллизатсия аз диаграммаи дар расми 1 оварда шуда фарқ мекунад.

Ҳамзамон чунин системаҳое шуданаш мумкин, ки хатти буриши (сечение) квазибинарӣ надоранд. Чунин системаҳоро одатан баргарданда-муовиза меноманд. Мисоли сохтори чунин диаграмма дар расми 3 оварда шудааст.



Расми 3. – Диаграммаи ҳолатии системаи секомпонентаи муовизаи баргарданда

Дар расми 3 нуқтаи Р ба мувозинати се фазаи саҳти АХ+АУ+ВХ бо маҳлули сер мувофиқ омада, аммо аз эвтоникаи Е₁ расми 1 бо он фарқ мекунад, ки ба ҷои кристаллизатсияи якҷояи се фазаи саҳти дар мувозинатбуда раванди инконгруэнтӣ ҷой дорад: намаки АХ ҳал шуда, намакҳои АУ ва ВХ ҷудо мешаванд. Агар дар омехтаи гирифташуда миқдори зарурии компоненти ВУ барои пурра табдилёбии намакҳои АХ ва АУ набошад, онгоҳ кристаллизатсия дар нуқта перитектикӣ (Р) ба охир мерасад. Дар ҳолати дигар кристаллизатсия дар нуқтаи эвтоникӣ, бо ҳосилшавии маҷмӯи намакҳои АХ, ВХ, ВУ ба охир мерасад. Дар чунин диаграммаҳои муовиза - баргарданда нуқтаҳои нонварианти дар як тарафи диагонали ҷуфт намакҳои системаро ташкилкунанда, ҷойгир мебошанд.

Ҷуфти намакҳо, дар мисоли мо АХ+АУ дар ҳарду нуқтаҳои нонварианти ҷудо шуда, ҷуфти системаҳои стабилро ташкил медиҳанд. Ҳамин тавр, дар системаҳои муовизаи баргарданда, агарчанде диагоналҳои стабилӣ набошад ҳам, ҷуфти стабилӣ намакҳои ҳастанд, ки ба таркиби ҳамагуна омехтаи ғудохтаи система дохиланд.

Аз ин лиҳоз мо низ дар таҳқиқи политермаи комплекси фазагӣ ва ҳалшавандагии системаи панҷкомпонентаи Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, CO_3^{2-} , HCO_3^- - H_2O , зерсистемаҳои чор ва секомпонентаи онро ташкилдиханда усули транслятсияро, ки аз ҷониби яке аз асосгузори асосҳои таҳлили физико-химиявӣ Лутфулло Солиев пешниҳод гардидааст, истифода намудем.

Маълумот оид ба ҳолати омӯзиши политермаи системаи панҷкомпонентаи Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, CO_3^{2-} , HCO_3^- - H_2O , 5 - системаҳои чор- ва 9-системаҳои секомпонентаи таркибдихандаи он дар ҷадвали 1 муттаҳид карда шудаанд.

Ҷадвали 1. – Ҳолати омӯзиши системаи панҷкомпонентаи Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, CO_3^{2-} , HCO_3^- - H_2O ва зерсистемаҳои чор-секомпонентаи он

Системаҳо	К-тнокӣ	Изотерма, °С				
		0	25	50	75	100
1	2	3	4	5	6	7
$\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}, \text{CO}_3^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$	5	-	-	-	-	-
$5\text{Na}^+ - \text{SO}_4^{2-} - \text{CO}_3^{2-} - \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$	4	-	-	-	-	-
$3\text{Ca}^{2+} - \text{SO}_4^{2-} - \text{CO}_3^{2-} - 2\text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$	4	-	-	-	-	-
$\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}, \text{CO}_3^{2-} - \text{H}_2\text{O}$	4	-	-	-	-	-
$\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$	4	-	-	-	-	-
$\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+} \parallel \text{CO}_3^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$	4	-	-	-	-	-
$2\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+} \parallel 2\text{SO}_4^{2-} - \text{H}_2\text{O}$	3	-	-	-	-	-
$2\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+} \parallel \text{CO}_3^{2-} - \text{H}_2\text{O}$	3	-	-	+	+	+
$4\text{Na}^+ \parallel \text{SO}_4^{2-}, \text{CO}_3^{2-} - \text{H}_2\text{O}$	3	+	+	+	+	+
$2\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}, \text{CO}_3^{2-} - \text{H}_2\text{O}$	3	+	+	+	+	+

Хотимаи ҷадвали 1						
1	2	3	4	5	6	7
$3\text{Na}^+ \parallel \text{SO}_4^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$	3	+	+	+	+	+
$3\text{Na}^+ \parallel \text{CO}_3^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$	3	+	+	+	+	+
$2\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}, 2\text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$	3	-	-	-	-	-
$\text{Ca}^{2+} \parallel \text{CO}_3^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$	3	-	-	-	-	-
$\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+} \parallel 3\text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$	3	-	-	-	-	-

Ҷадвали 1 ифода менамояд, ки системаи панҷкомпонентаи $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}, \text{CO}_3^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$ аслан таҳқиқ нашудааст. Аз 5 - зерсистемаҳои чоркомпонента танҳо яктоаш $5\text{Na}^+ - \text{SO}_4^{2-} - \text{CO}_3^{2-} - \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$ дар сатҳи секомпонентагӣ таҳқиқ шуда бошад ҳам аммо, диаграммаи ҳалшавӣ ё комплексҳои фазагии онҳо низ сохта нашудаанд. Системаҳои $3\text{Ca}^{2+} - \text{SO}_4^{2-} - \text{CO}_3^{2-} - 2\text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$, $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}, \text{CO}_3^{2-} - \text{H}_2\text{O}$, $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$, $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+} \parallel \text{CO}_3^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$ умуман таҳқиқ нашуда, диаграммаҳои фазагӣ, ҳалшавандагӣ ва политермиашон сохта нашудаанд. Дигар системаҳо, ки зерсистемаҳои секомпонентаи онро ташкилдихандаанд, дар ҳароратҳои интиҳобшудаи таҳқиқоти илмӣ аслан омӯхта нашудаанд ва диаграммаҳои политермаи ҳалшавӣ, комплексҳои фазагиашон сохта нашудаанд.

Политермаи комплекси фазагии системаи $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}, \text{CO}_3^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$ дар сатҳи таркиби чоркомпонента

Дар корҳои қаблӣ усули транслятсия, дар шакли гузариши тасвирҳои геометрӣ дар диаграммаҳои ҳолат аз минтақаи таркиби n – компонента ба минтақаи таркиби $n+1$ компонентнокӣ истифода шудааст. Транслятсия инчунин, ба самти ҳама гуна параметри нави ҳолат: ҳарорат, фишор, потенциали химиявӣ ва ғайра сурат мегирад. Дар ин маврид, диаграммаи ҳолат компонентнокии тағйирнопазир дорад.

Ҳангоми транслятсия ба самти компонентнокии навбатӣ, диаграммаҳои ҳолати системаҳои ҷузъии аз n – компонентҳо (изотермаҳо ё политермаҳои системаҳо) ҳамчун маълумоти ибтидоӣ барои сохтани диаграммаи ҳолати системаи умумӣ аз $n+1$ компонент иборатбуда муҳим мебошанд. Барои сохтани политермаи системаи аз n – компонент иборатбуда бо усули транслятсия, изотермаҳои ин система ҳамчун маълумоти ибтидоӣ хизмат мекунанд. Диаграммаҳои ҳалшавӣ одатан-асосан дар шакли буришҳои изотермӣ (изотермаҳои ҳалшавӣ) сохта мешаванд. Ин барои гузаронидани таҷриба басо қулай аст. Ҳангоми муайян кардани ҳалшавӣ, гузаронидани таҷриба дар ҳарорати доимӣ осонтар аст. Диаграммаҳои ғудохта бошад, бо истифода аз қатъҳои гармкунӣ ва хунуккунӣ дар термограммаҳо дар шакли политермаҳо сохтан қулайтар аст. Дар қори мо, усули транслятсия дар ҳарду вариант истифода шудааст.

Политермаи системаи чоркомпонентаи $5\text{Na}^+ - \text{SO}_4^{2-} - \text{CO}_3^{2-} - \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$ дар фосилаи ҳароратҳои $0 \div 100$ °C, ки иони умумӣ (Na^+) дорад. Изотермаи 0 °C. Мувофиқи сарчашмаҳои илмӣ системаҳои сатҳи таркиби секомпонента: $3\text{Na}^+ - \text{SO}_4^{2-} - \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$; $3\text{Na}^+ - \text{CO}_3^{2-} - \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$ ва $4\text{Na}^+ - \text{SO}_4^{2-} - \text{CO}_3^{2-} - \text{H}_2\text{O}$ дар 0 °C хуб омӯхта шудаанд. Барои онҳо яктогӣ нуқтаҳои нонвариантии E_1^3 , E_2^3 ва E_3^3 бо фазаҳои мувозинатии саҳти $\text{Mb} + \text{Nk}$, $\text{Na10} + \text{Nk}$, ва $\text{Mb} + \text{Na10}$ -ро доранд, ки дар сатҳи компонентнокии умумӣ мувозинати моновариантии хатхоро ифода мекунанд. Дар фазои сатҳи компонентнокии чор пас аз интиқоли нуқта ва маҳдудшавӣ дар шакли ифодаи нонвариантии чоркомпонента як нуқтаи нонвариантии E_1^4 – ро бо мувозинати $\text{Mb} + \text{Na} \cdot 10 + \text{Nk}$ ҳосил мекунанд.

Изотермаи 25 °C. Дар изотермаи мазкур миқдори нуқтаҳои нонвариантии системаҳои секомпонента чунианд: $3\text{Na}^+ - \text{SO}_4^{2-} - \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O} - E_1^3 = \text{Mb} + \text{Nk}$; $3\text{Na}^+ - \text{CO}_3^{2-} - \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O} - E_2^3 = \text{Mb} + \text{Tr}$, $E_3^3 = \text{Tr} + \text{Na10}$; $4\text{Na}^+ - \text{SO}_4^{2-} - \text{CO}_3^{2-} - \text{H}_2\text{O} - E_4^3 = \text{Na10} + \text{Mb}$. Дар натиҷаи иловаи компоненти чорум ба яке аз системаҳои секомпонента, нуқтаҳои нонвариантии дар сатҳи умумӣ дар шакли трансформатсияшуда, транслятсия

гардида нуктаҳои нонвариантии E_1^4 ва E_2^4 – ро бо фазаҳои мувозинатии $Mb + Nk + Tr$ ва $Na_{10} + Tr + Mb$ ҳосил мекунад.

Изотермаҳои 50 ва 75 °C. Дар системаи мазкур баланд шудани ҳарорат ба таъири фазагӣ меоварад, ки ин аз зерсистемаҳои секомпонента алоқаманд аст. Мувозинати нуктаҳои нонвариантии $E_1^3 = Te + Nk$ барои системаи $3Na^+ - SO_4^{2-} - HCO_3^- - H_2O$, $E_2^3 = Nk + Tr$, $E_3^3 = Na_{10} + Tr$ барои системаи $3Na^+ - CO_3^{2-} - HCO_3^- - H_2O$ ва $E_4^3 = Te + Br$, $E_5^3 = Br + Na_{10}$ дар системаи $4Na^+ - SO_4^{2-} - CO_3^{2-} - H_2O$ мебошанд. Дар сатҳи таркиби компонентнокии навбатӣ бошад, барои система мувозинати нуктаҳои нонвариантии чунинанд: фазаҳои $Te + Br + Nk$ дар нуктаи нонвариантии E_1^4 ; фазаҳои $Na_{10} + Br + Tr$ дар нуктаи нонвариантии E_2^4 ва фазаҳои $Nk + Br + Tr$ дар нуктаи нонвариантии E_3^4 . Чи тавре дида мешавад дар изотермаҳои 50 ва 75 °C мувозинати фазагӣ дар системаҳо яхела мебошад.

Изотермаи 100 °C. Афзоиши ҳарорат аз 75 то 100 °C яке аз зерсистема-системаи $3Na^+ - CO_3^{2-} - HCO_3^- - H_2O$ – ро ба таъири фазагӣ дучор мешавад. Зимни таъсири муттақобилаи фазаҳои нахколит ва трона намаки омехтаи $3Na \cdot C$ ҳосил мешавад, ки ба сохтори диаграмма низ дигаргуни ворид менамояд. Аз ин лиҳоз миқдори максималии шаклҳои геометрӣ дар системаи чоркомпонентаи мазкур дар изотермаи 100 °C ба назар мерасад. Яъне, миқдори нуктаҳои нонвариантии сатҳи секомпонента 6 то аз ҷумла: $E_1^3 = Te + Nk$; $E_2^3 = Nk + 3Na \cdot C$; $E_3^3 = Tr + 3Na \cdot C$; $E_4^3 = 3Na \cdot C + Na_{10}$; $E_5^3 = Te + Br$ ва $E_6^3 = Br + Na_{10}$, сатҳи чоркомпонента бошад 4 то ($E_1^4 = Te + Nk + 3Na \cdot C$, $E_2^4 = Na_{10} + Tr + Br$, $E_3^4 = Te + Tr + Br$ ва $E_4^4 = 3Na \cdot C + Tr + Te$) мебошанд.

Политермаи системаи чоркомпонентаи $3Ca^{2+} - SO_4^{2-} - CO_3^{2-} - 2HCO_3^- - H_2O$ дар фосилаи 0 ÷ 100 °C, ки иони умумӣ (Ca^{2+}) доранд. Системаи $3Ca^{2+} - SO_4^{2-} - CO_3^{2-} - 2HCO_3^- - H_2O$ иони умумии калсий дошта, дар таркибаш пайвастиҳои зерини химиявии калсийдор ба мушоҳида мерасанд: $CaSO_4$; $CaCO_3$; $Ca(HCO_3)_2$ ва H_2O . Ҳамзамон он ба системаҳои секомпонентаи $2Ca^{2+} - SO_4^{2-} - CO_3^{2-} - H_2O$, $2Ca^{2+} - SO_4^{2-} - 2HCO_3^- - H_2O$ ва $2Ca^{2+} - CO_3^{2-} - 2HCO_3^- - H_2O$ ҷудо мешаванд. Таҳлили адабиёт ифода мекунад, ки системаи чоркомпонента умуман омехта нашудааст ва барои онҳо нуктаҳои нонвариантии зерини эвтоникии оддӣ имконпазиранд: $2Ca^{2+} - SO_4^{2-} - CO_3^{2-} - H_2O - E_1^3 = Gr + CaH$; $2Ca^{2+} - SO_4^{2-} - 2HCO_3^- - H_2O - E_2^3 = Cs + CaG$ ва $2Ca^{2+} - CO_3^{2-} - 2HCO_3^- - H_2O - E_3^3 = Gr + Cs$. Дар натиҷаи иловаи компоненти навбатӣ ба яке аз зерсистемаҳо нуктаи нонвариантии зерин ҳосил мешавад, ки онро ба таври математикӣ чунин ифода мекунад: $E_1^3 + E_2^3 + E_3^3 \rightarrow E_1^4 = Gr + Cs + CaH$. Чунин мувозинати фазагӣ дар системаи мазкур дар фосилаи ҳароратҳои 0 ÷ 100 °C хос мебошад.

Политермаи системаи чоркомпонентаи муовизаи обӣ-намакии сулфатҳо, карбонатҳои натрий ва калсий дар фосилаи 0 ÷ 100 °C. Изотермаи 0 °C. Системаҳои секомпонентаи $4Na^+ - SO_4^{2-} - CO_3^{2-} - H_2O$; $2Na^+ - Ca^{2+} - 2SO_4^{2-} - H_2O$; $2Na^+ - Ca^{2+} - 2CO_3^{2-} - H_2O$ ва $2Ca^{2+} - SO_4^{2-} - 2HCO_3^- - H_2O$ системаи чоркомпонентаи Na^+ , $Ca^{2+} \parallel SO_4^{2-}$, $CO_3^{2-} - H_2O$ -ро муттаҳид мекунад. Дар изотермаи 0 °C барои онҳо 5 нуктаи нонвариантии хос буда, транслятсияшон ба сатҳи чоркомпонентагӣ ба ҳосилшавии 3 нуктаи нонвариантии E_1^4 , E_2^4 ва E_3^4 меоварад, ки барои онҳо фазаҳои мувозинатии $Mb + Gl + Na_{10}$, $Gr + Cs + Gl$ ва $Mb + Gr + Gl$ мавҷуд аст.

Изотермаи 25 °C. Миқдори ифодаҳои геометрӣ, хусусан нуктаҳои нонвариантии дар яке аз зерсистемаҳои секомпонента - системаи $2Na^+ - Ca^{2+} - 2SO_4^{2-} - H_2O$ бештар ба назар мерасад. Ин ба таъири фазагӣ дучор гардидани он алоқаманд буда, ифода мекунад, ки аз таъсири компонентҳои калсит ва декагидрати карбонати натрий фазаи нави глауберит, ки намаки дучандаи сулфатҳои натрий ва калсий мебошад, алоқаманд аст. Бинобар ин мувозинатҳои нонвариантии дар онҳо чунин мебошад: $Mb + Na_{10}$ барои нуктаи E_1^3 ; $Gb + Mb = E_2^3$; $Gr + Gb = E_3^3$; $Cs + Gr = E_4^3$; $Na_{10} + Gl = E_5^3$ ва $Gl + Cs$. Ҳамзамон барои таркиби чоркомпонента бошад фазаҳои мувозинатии $Mb + Na_{10} + Gb$, $Gb + Gr + Cs$, $Na_{10} + Gl + Gb$, $Gl + Gb + Cs$ дар нуктаҳои E_7^4 , E_8^4 , E_9^4 ва E_{10}^4 дар мувозинат мебошанд.

Изотермаи 50 °C. Баландшавии ҳарорат аз 25 то 50 °C дар системаи чоркомпонентаи зерин тағйироти фазагӣ ба назар мерасад, ки тағйир ёфтани миқдори шаклҳои геометрӣ меоварад. Чунин тағйирот дар шакли дегидрататсияи кристаллогидратҳои намакҳои миёна ва дучанда меоварад. Мисол, дар системаи секомпонентаи $4\text{Na}^+ - \text{SO}_4^{2-} - \text{CO}_3^{2-} - \text{H}_2\text{O}$ фазаҳои мирабилит ва декагидрати карбонати натрий аз таъсири ҳарорат яке 10 молекула ва дигаре 9 молекулаи обашонро гум карда, ба тенардит ва термонатрит табдил меёбанд. Инчунин, тенардит ва термонатрит ба таъсири химиявӣ дучор шуда, фазаи нави беркеитро ҳосил мекунанд, ки сохтори диаграммаро дар системаи мазкур барои изотермаи 50 °C тағйир медиҳад. Системаи дар сатҳи таркиби чоркомпонента дорои чунин нуқтаҳои нонвариантии бо фазаҳои саҳти мувозинати мебошанд: $E_8^3 = \text{Te} + \text{Br} + \text{Gr}$; $E_9^3 = \text{Gb} + \text{Gr} + \text{Cc}$; $E_{10}^3 = \text{Br} + \text{Pr} + \text{NaI}$; $E_{11}^3 = \text{Gb} + \text{Pr} + \text{Cc}$; $E_{12}^3 = \text{Gb} + \text{Pr} + \text{Br}$.

Изотермаи 75 °C. Ҳангоми таҳқиқот маълум шуд, ки дар чунин системаи миқдори максималии шаклҳои геометрӣ дар изотермаи 75 °C ба назар мерасад, ки ин ба ҳосилшавии фазаи нави мувозинати $5\text{Ca} \cdot \text{Na} \cdot 3$ алоқаманд мебошад. Ташаккули чунин фаза дар зерсистемаи $2\text{Na}^+ - \text{Ca}^{2+} - \text{SO}_4^{2-} - \text{H}_2\text{O}$ ба назар расида, он зимни таъсири муттақобилаи кристаллогидрати гипс ва намаки дучандаи глауберит ба назар мерасад. Мувозинати нуқтаҳои нонвариантии системаҳои секомпонентаи системаи таҳқиқшаванда чунин мебошанд: $E_4^3 = \text{Te} + \text{Br}$; $E_5^3 = \text{Br} + \text{NaI}$ дар системаи $4\text{Na}^+ - \text{SO}_4^{2-} - \text{CO}_3^{2-} - \text{H}_2\text{O}$, $E_{12}^3 = \text{Te} + \text{Gb}$; $E_{13}^3 = \text{Gb} + 5\text{Ca} \cdot \text{Na} \cdot 3$; $E_{14}^3 = \text{Gr} + 5\text{Ca} \cdot \text{Na} \cdot 3$ дар системаи $2\text{Na}^+ - \text{Ca}^{2+} - \text{SO}_4^{2-} - \text{H}_2\text{O}$, $E_8^3 = \text{Cc} + \text{Gr}$ дар системаи $2\text{Ca}^{2+} - \text{CO}_3^{2-} - \text{SO}_4^{2-} - \text{H}_2\text{O}$, $E_{15}^3 = \text{NaI} + \text{Pr}$; $E_{16}^3 = \text{Pr} + \text{Cc}$ дар системаи $2\text{Na}^+ - \text{Ca}^{2+} - \text{CO}_3^{2-} - \text{H}_2\text{O}$. Фазаҳои мувозинати нуқтаҳои нонвариантии чоркомпонента инҳоянд: $E_9^4 = \text{Te} + \text{Br} + \text{Gb}$; $E_{10}^4 = \text{NaI} + \text{Br} + \text{Pr}$; $E_{11}^4 = 5\text{Ca} \cdot \text{Na} \cdot 3 + \text{Gr} + \text{Cc}$; $E_{12}^4 = \text{Br} + \text{Gb} + 5\text{Ca} \cdot \text{Na} \cdot 3$; $E_{13}^4 = \text{Cc} + \text{Pr} + 5\text{Ca} \cdot \text{Na} \cdot 3$ ва $E_{14}^4 = \text{Br} + \text{Pr} + 5\text{Ca} \cdot \text{Na} \cdot 3$.

Изотермаи 100 °C. Дар изотермаи 100 °C аз таъсири ҳарорат фазаи дар 75 °C стабилӣ $5\text{Ca} \cdot \text{Na} \cdot 3$ нест шуда, сохтори диаграммаи комплекси фазাগиро нисбаттан соддатар менамояд. Миқдори нуқтаҳои нонвариантии сатҳи таркиби секомпонентаи системаи муовизаи таҳқиқшаванда чунин аст: $4\text{Na}^+ - \text{SO}_4^{2-} - \text{CO}_3^{2-} - \text{H}_2\text{O} - E_5^3 = \text{Te} + \text{Br}$, $E_6^3 = \text{Br} + \text{NaI}$; системаи $2\text{Na}^+ - \text{Ca}^{2+} - 2\text{SO}_4^{2-} - \text{H}_2\text{O} - E_{13}^3 = \text{Te} + \text{Gb}$, $E_{14}^3 = \text{Gb} + \text{Gr}$; системаи $2\text{Ca}^{2+} - \text{CO}_3^{2-} - \text{SO}_4^{2-} - \text{H}_2\text{O} - E_9^3 = \text{Cc} + \text{Gr}$; системаи $2\text{Na}^+ - \text{Ca}^{2+} - 2\text{CO}_3^{2-} - \text{H}_2\text{O} - E_{15}^3 = \text{NaI} + \text{Pr}$, $E_{16}^3 = \text{Pr} + \text{Cc}$. Нуқтаҳои нонвариантии сатҳи таркиби чоркомпонентае, ки дар натиҷаи маҳдудшавии ҳаҷми моновариантии ҳосил шудаанд, бо фазаҳои саҳти мувозинатиашон чунинанд: $E_9^4 = \text{Te} + \text{Br} + \text{Gb}$; $E_{10}^4 = \text{NaI} + \text{Br} + \text{Pr}$; $E_{11}^4 = \text{Gb} + \text{Gr} + \text{Cc}$; $E_{12}^4 = \text{Cc} + \text{Gb} + \text{Pr}$ ва $E_{13}^4 = \text{Br} + \text{Pr} + \text{Gb}$.

Политермаи системаи чоркомпонентаи обӣ-намакии муовизаи сулфатҳо, гидрокарбонатҳои натрий ва калсий дар фосилаи 0÷100 °C. Изотермаи 0 °C. Системаи физико-химиявии Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, $\text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$ зерсистемаҳои секомпонентаи зеринро дар бар мегирад: $2\text{Na}^+ - \text{Ca}^{2+} - 2\text{SO}_4^{2-} - \text{H}_2\text{O}$; $\text{Na}^+ - \text{Ca}^{2+} - 3\text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$; $3\text{Na}^+ - \text{SO}_4^{2-} - \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$; $2\text{Ca}^{2+} - \text{SO}_4^{2-} - 2\text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$. Барои ҳамаи зерсистемаҳои секомпонента яктогӣ нуқтаҳои нонвариантии хос мебошанд, ки инҳоянд: $E_1^3 = \text{Mb} + \text{Nk}$, $E_2^3 = \text{Nk} + \text{CaH}$, $E_3^3 = \text{Gr} + \text{CaH}$ ва $E_4^3 = \text{Mb} + \text{Gr}$. Нуқтаҳои нонвариантии дар натиҷаи транслятсия ҳосилшудаи изотермаи 0 °C E_3^4 ва E_4^4 буда, дар онҳо фазаҳои $\text{Gr} + \text{Mb} + \text{Nk}$ ва $\text{Gr} + \text{Nk} + \text{CaH}$ дар мувозинат қарор доранд.

Изотермаи 25 °C. Нуқтаҳои нонвариантии системаи таҳқиқшаванда, ки дар 25 °C бо усули транслятсия муайян карда шудаанд, E_4^4 , E_5^4 ва E_6^4 буда, нуқтаҳои мазкур дар мувозинат будани фазаҳои $\text{Nk} + \text{Mb} + \text{Gb}$, $\text{CaH} + \text{Gb} + \text{Gr}$ ва $\text{Gb} + \text{CaH} + \text{Nk}$ маънидод мекунанд. Нуқтаҳои нонвариантии ҳангоми маҳдудшавии ҳаҷми моновариантие ҳосил шудаанд, ки зимни трансформатсия чунин шаклҳо бо фазаҳои мувозинати ба даст омадаанд: $E_1^3 = \text{Nk} + \text{Mb}$; $E_2^3 = \text{CaH} + \text{Nk}$; $E_3^3 = \text{Gr} + \text{CaH}$; $E_4^3 = \text{Mb} + \text{Gb}$ ва $E_5^3 = \text{Gb} + \text{Gr}$.

Изотермаи 50 °C. Миқдори шаклҳои геометрии системаи мазкур дар изотермаи 50 °C ба миқдори ифодаҳои изотермаи 25 °C баробар буда, дар танҳо тағйирот дар фазаи саҳти мувозинати мирабилит ва табдилёбии он ба тенардит дида мешавад.

Чунин табдилот мувозинатро дар нуктаҳое, ки дар он мирабилит мавҷуд буд, тағйир медиҳад. Мисоли ин нуктаҳо E_1^3 ва E_5^3 мебошанд, ки ҳолати фазавии $Te + Nk$ ва $Gb + Te$ – ро ифода мекунанд.

Изотермаи 75 °C. Ифодаҳои геометрие, ки дар маҳдудшавии фазои компонентнокии умумӣ нуктаҳои нонвариантии сатҳи компонентнокии умумиро ҳосил мекунанд, дар муқоиса ба изотермаи 50 °C зиёдтаранд 16 бар 18. Ин аз таъсири муттақобилаи байни қисмҳои таркибӣ дар системаи секомпонентаи $2Na^+-Ca^{2+}-2SO_4^{2-}-H_2O$ вобаста буда, дар он ҳангоми таъсир ҳосилшавии фазои мувозинатии $5Ca \cdot Na \cdot 3$ дар байни сульфатҳои натрий ва калсий ба назар мерасад. Дар маҷмӯъ миқдори нуктаҳои нонвариантии сатҳи секомпонента бо фазҳои мувозинатӣ дар онҳо чунин мебошад: $E_9^3 = Nk + Te$; $E_{10}^3 = CaH + Nk$; $E_{11}^3 = Gr + CaH$; $E_{12}^3 = Te + Gr$; $E_{13}^3 = Gb + 5Ca \cdot Na \cdot 3$; $E_{14}^3 = 5Ca \cdot Na \cdot 3 + Gr$ ва мувозинати нуктаҳои сатҳи чоркомпонента бошанд, инҳоянд: $Nk + Te + Gb = E_5^4$, $CaH + Gr + 5Ca \cdot Na \cdot 3 = E_6^4$, $Gb + CaH + Nk = E_7^4$, $Gb + CaH + 5Ca \cdot Na \cdot 3 = E_8^4$.

Изотермаи 100 °C. Афзоиши ҳарорат аз 75 то 100 °C яке аз зерсистема-системаи $3Na^+-CO_3^{2-}-HCO_3^- -H_2O$ – ро ба тағйироти фазавӣ дучор мешавад. Зимни таъсири муттақобилаи фазҳои нахколит ва трона намаки омехтаи $3Na \cdot C$ ҳосил мешавад, ки ба сохтори диаграмма низ дигаргуни ворид менамояд. Аз ин лиҳоз миқдори максималии шаклҳои геометрӣ дар системаи чоркомпонентаи мазкур дар изотермаи 100 °C ба назар мерасад. Яъне, нуктаҳои нонвариантии сатҳи чоркомпонента $E_6^4 = Nk + Te + Gb$; $E_7^4 = CaH + Gb + Gr$; $E_8^4 = Gb + CaH + Nk$ мебошанд.

Политермаи системаи чоркомпонентаи обӣ-намакии муовизаи карбонатҳо ва гидрокарбонатҳои натрий ва калсий дар фосилаи ҳароратҳои 0÷100 °C. Изотермаи 0 °C. Системаҳои секомпонентаи зерин: $3Na^+-CO_3^{2-}-HCO_3^- -H_2O$; $2Na^+-Ca^{2+}-CO_3^{2-}-H_2O$; $Na^+-Ca^{2+}-HCO_3^- -H_2O$ ва $Ca^{2+}-CO_3^{2-}-HCO_3^- -H_2O$ таркиби чор самти пирамидаи диаграммаи системаи Na^+ , $Ca^{2+} \parallel CO_3^{2-}$, $HCO_3^- -H_2O$ мебошанд. Дар изотермаи 0 °C барои онҳо 5 нуктаи нонвариантии хос буда, транслятсияшон ба сатҳи чоркомпонентагӣ ба ҳосилшавии 3 нуктаи нонвариантии E_8^4 , E_9^4 ва E_{10}^4 меоварад, ки барои онҳо фазҳои мувозинатии $Na \cdot 10 + Nk + Gl$, $Cs + Gl + CaH$ ва $Nk + CaH + Gl$ мавҷуд аст.

Изотермаи 25 °C. Миқдори ифодаҳои геометрӣ, хусусан нуктаҳои нонвариантии дар ду зерсистемаҳои секомпонента – системаи $3Na^+-CO_3^{2-}-HCO_3^- -H_2O$ бештар ба назар мерасад. Ин ба тағйироти фазавӣ дучор гардидани он алоқаманд буда, ифода мекунад, ки аз таъсири компонентҳои нахколит ва декагидрати карбонати натрий фазои нави глауберит, ки намаки дучандаи сульфатҳои натрий ва калсий мебошад, алоқаманд аст. Бинобар ин мувозинатҳои нонвариантии дар онҳо чунин мебошад: $Na \cdot 10 + Tr$ барои нуктаи E_1^3 ; $Tr + Nk$ барои нуктаи E_2^3 . Мувозинатҳои фазавии дигар нуктаҳои нонвариантии дар сатҳи секомпонентаи таркиб $Na \cdot 10 + Gl = E_3^3$; $Gl + Cs = E_4^3$; $Cs + CaH = E_5^3$ ва $CaH + Nk = E_6^3$. Дар баробари ин барои таркиби чоркомпонента бошад фазҳои мувозинатии $Na \cdot 10 + Tr + Gl$, $Tr + Nk + CaH$, $Cs + Gl + CaH$, $Tr + CaH + Gl$ дар нуктаҳои E_{11}^4 , E_{12}^4 , E_{13}^4 ва E_{14}^4 дар мувозинат мебошанд.

Изотермаҳои 50 ва 75 °C. Балансшавии ҳарорат аз 25 то 50 ва аз 50 то 75 °C дар системаи чоркомпонентаи зерин тағйироти фазавӣ ба назар мерасад, аммо ин тағйироти фазавӣ миқдори шаклҳои геометрӣ тағйир намедиҳад. Дар ҳарду изотерма онҳо баробар мебошанд. Тағйироти фазавии изотермаҳои мазкур дар дегидротатсияи декагидрати карбонати натрий ва мубаддалшавии он ба термонатрит ва дегидрататсияи гейлюссит ва ҳосилшавии пирсонит ба мушоҳида мерасад.

Изотермаи 100 °C. Ҳангоми таҳқиқот маълум шуд, ки дар чунин система миқдори максималии шаклҳои геометрӣ дар изотермаи 100 °C ба назар мерасад, ки ин ба ҳосилшавии фазои нави мувозинатии $3Na \cdot C$ алоқаманд мебошад. Ташаккули чунин фаза дар зерсистемаи $3Na^+-CO_3^{2-}-HCO_3^- -H_2O$ ба назар расида, он зимни таъсири муттақобилаи кристаллогидрати намаки омехтаи трона ва нахколит ба мушоҳида мерасад. Мувозинати нуктаҳои нонвариантии системаҳои секомпонентаи системаи

тахқиқшаванда чунин мебошанд: $E_{17}^3 = NaI + Tr$; $E_{18}^3 = Tr + 3Na \cdot C$; $E_{19}^3 = 3Na \cdot C + Nk$ дар системаи $3Na^+ - CO_3^{2-} - HCO_3^- - H_2O$, $E_{15}^3 = NaI + Pr$; $E_{16}^3 = Pr + Cc$ дар системаи $2Na^+ - Ca^{2+} - 2CO_3^{2-} - H_2O$, $E_{20}^3 = Cc + CaH$ дар системаи $2Ca^{2+} - CO_3^{2-} - 2HCO_3^- - H_2O$, $E_{21}^3 = CaH + Nk$ дар системаи $Na^+ - Ca^{2+} - 3HCO_3^- - H_2O$. Фазаҳои мувозинатии нуктаҳои нонвариантии чоркомпонента инҳоянд: $E_{14}^4 = NaI + Tr + Pr$; $E_{15}^4 = Cc + Pr + CaH$; $E_{16}^4 = 3Na \cdot C + Nk + CaH$; $E_{17}^4 = 3Na \cdot C + Tr + Pr$ ва $E_{18}^4 = 3Na \cdot C + Pr + CaH$.

Политермаи сохтори комплекси фазагии системаи $Na^+, Ca^{2+} \parallel SO_4^{2-}, CO_3^{2-}, HCO_3^- - H_2O$

Вижагии асосии сохтани диаграммаҳои комплексҳои фазагии СБК бо усули транслятсия дар он аст, ки дар ин раванд хосиятҳои топологии ифодаҳои геометрии системаҳои оддӣ (чузъӣ) ва мураккаб (умумӣ) дар як диаграмма истифода мешаванд. Дар ин раванд диаграммаи комплекси фазавӣ сохта мешавад, ки қисми таркибӣ ва мустақили диаграммаи ҳолат мебошад. Ин гуна муносибат имкон медиҳад, ки ҳамаи мувозинатҳои фазавии имконпазир дар шаклҳои геометрӣ ва ҷойгиршавии мутақобилаи онҳо бе зарурати муайян кардани координатҳояшон нишон дода шаванд. Яъне сохтани диаграммаҳои комплекси фазавии СБК.

Усули транслятсия пешбинӣ менамояд, ки ҳангоми ба вучуд омадани системаи мураккаби $n+1$ - компонента тавассути илова кардани компоненти навбатӣ ба системаи оддӣ аз n - компонента, андозагирии ифодаҳои сохтори система зиёд мешавад: нуктаҳои нонварианти ба қачхатҳои моноварианти, қачхатҳои моноварианти ба майдонҳои диварианти, майдонҳои диварианти ба ҳаҷм ва ғайра табдил меёбанд.

Шаклҳои геометрии мазкур дар сатҳи таркиби умумии системаи $n+1$ - компонента, ҳангоми вохурии байниҳамдигар, тасвирҳои геометрии системаи умумиро ҳосил мекунанд. Нуктаҳои нонварианти ҳангоми буриш қачхатҳои моновариантиро ба вучуд меоранд. Қачхатҳои моноварианти майдонҳои дивариантро ва майдонҳои диварианти ҳаҷм ва диаграммаи сарбасти комплекси фазавии системаи умумиро ташкил медиҳанд. Комплекси фазавӣ дар тасвирҳои геометрӣ ба таври зерин пешбинӣ мешаванд.

Нуктаҳои нонварианти. Азбаски мувофиқи қоидаи фазаҳои Гиббс буриши тасвирҳои геометрӣ дар ҳолате имконпазир аст, ки онҳо аз якдигар бо як фаза фарқ кунанд. Нуктаҳои эҳтимолии нонвариантии системаи умумиро метавон ба таври математикӣ бо усули пайваستшавӣ (сочетание) пайдо кард. Нуктаҳои нонвариантии системаҳои чузъӣ, ки аз якдигар бо як фаза фарқ мекунанд, бо ҳам пайваст мешаванд. Ин усул ба таври шартӣ транслятсияи «дутарафа» номида мешавад. Дар диаграммаи мувозинати фазавӣ ин тавассути буриши қачхатҳои моноварианти, ки аз нуктаҳои нонвариантии системаҳои чузъӣ (ду намуди гуногун) сарчашма мегиранд, амалӣ мегардад (расми 4. а). Дар расми 4, а, аломати секунча маънои онро дорад, ки нуктаҳои чоргонаи E_1^4 ва E_2^4 ба системаҳои гуногун тааллуқ доранд ва бо як нуктаи сегонаи нонварианти алоқаманданд, ки дар минтақаи таркиби чоргона ба қачхати моноварианти мегузарад. Дар транслятсияи дутарафа имкони пайдоиши гурӯҳи нуктаҳои нонварианти бо таркиби фазавии якхелаи таҳшинҳо вучуд дорад. Дар изотермаҳои комплекси фазавӣ онҳо ҳамчун як нуктаи нонварианти, ки аз буриши зиёда аз ду қачхати моноварианти ба вучуд омадаанд, инъикос меёбанд.

Нуктаҳои нонвариантии системаҳои таркибии чузъӣ, ки дар дигар системаҳои чузъӣ шариконе барои пайвастшавӣ пайдо накардаанд, ба минтақаи таркиби умумӣ аз рӯи намуди «яктарафа» транслятсия мешаванд. Дар диаграммаи комплекси фазавӣ чунин транслятсия тавассути буриши қачхати моноварианти, ки аз нуктаи нонвариантии системаи чузъӣ оғоз меёбад, бо қачхати моноварианти, ки дар байни нуктаҳои нонвариантии системаи умумӣ мегузарад (расми 4, б, нуктаи E_2^5), амалӣ мегардад. Имконияти пайдоиши нуктаҳои нонвариантии системаи умумӣ тавассути буриши қачхатҳои моноварианти, ки танҳо дар байни нуктаҳои нонвариантии системаи умумӣ мегузаранд, вучуд дорад (расми 4, в, нуктаи E_4^5). Ин гуна нуктаҳои нонварианти ба таври «мобайнӣ» муайяншуда номида мешаванд.

Нуктаҳои нонвариантии системаи умумӣ, ки бо усули транслятсия муайян шудаанд, метавонанд аз меъёри зарурӣ барои сарбастии шаклҳои геометрии ва сохтани диаграммаи комплекси фазагӣ бештар бошанд. Дар ин ҳолат, нуктаҳои нонвариантии муайян карда мешаванд, ки дар сарбастшавии ҷодаҳои геометрии иштирок намеkunанд ва ҳамчун изофӣ рад карда мешаванд.

Хатҳои моновариантии. Качхатҳои моновариантии СБК пайдоиши духелагӣ доранд. Ин маънои онро дорад, ки онҳо метавонанд аз ду манбаи гуногун дар дохили диаграммаи комплекси фазагӣ ба вучуд оянд. Яке аз онҳо метавонад ҳамчун натиҷаи транслятсияи нуктаҳои нонвариантии системаҳои ҷузъӣ ба минтақаи таркиби умумӣ ба вучуд оянд (онҳо дар расми 4, а бо хатҳои фосилатор ишора шудаанд: E_1^4 --- E_1^5 ; E_2^4 --- E_1^5 ; E_3^4 --- E_2^5 ; E_4^4 --- E_3^5). Дигар бошанд, ҳамчун пайвасткунандаи нуктаҳои нонвариантии системаи умумӣ буда, дар расми 4, б бо хатҳои ғарси яклухт ишора шудаанд (E_1^5 - E_2^5 ; E_1^5 - E_4^5 ; E_3^5 - E_4^5). Навъи аввали качхатҳои моновариантии метавонанд пешбинӣ карда шаванд. Онҳо шакли транслятсияшудаи нуктаҳои нонвариантии системаҳои ҷузъӣ ба минтақаи таркиби умумӣ мебошанд. Боқимонда ҳангоми сохтани диаграммаи сарбастии комплекси фазагии системаи таҳқиқшавандаи Na^+ , $Ca^{2+} \parallel SO_4^{2-}$, CO_3^{2-} , $HCO_3^- - H_2O$ муайян карда мешаванд.

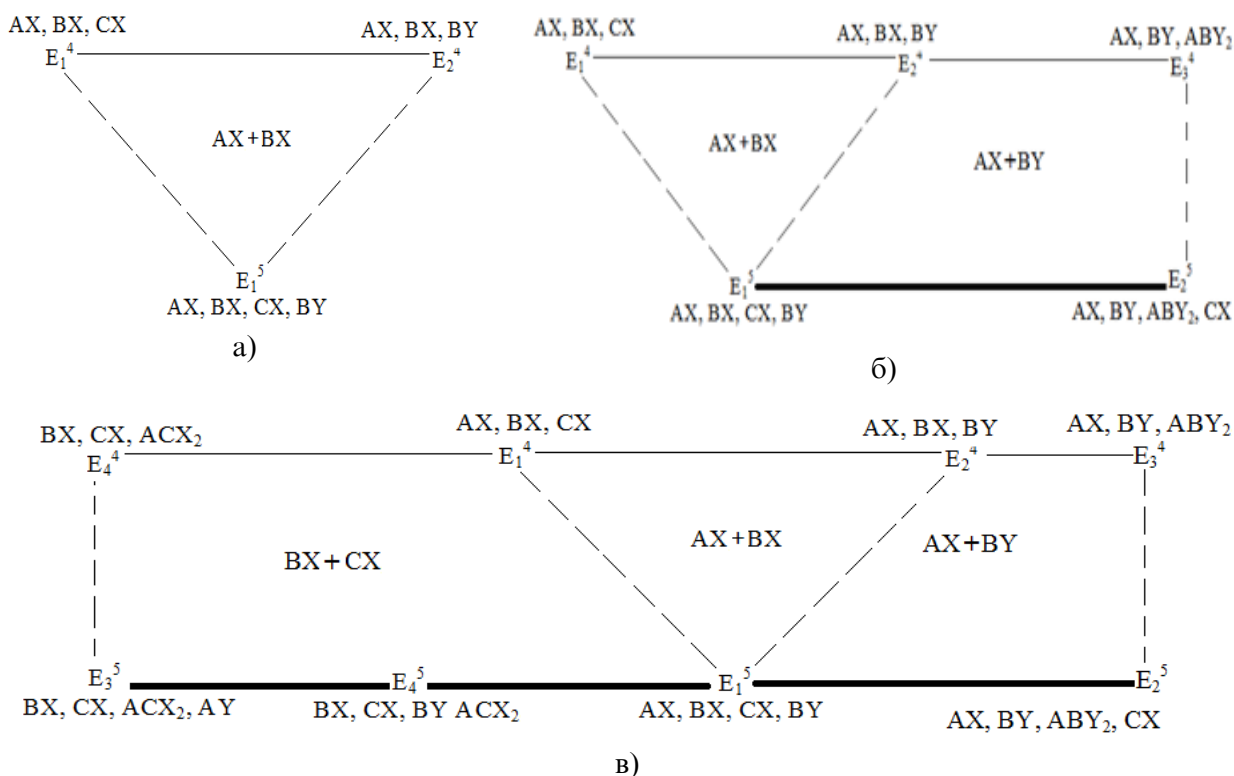
Ҳангоми гузаронидани качхатҳои моновариантии дар байни нуктаҳои нонвариантии системаи умумӣ, мумкин аст ду ва зиёда аз он качхатҳо бо таркиби фазагии яхелаи таҳшинҳо пайдо шаванд. Дар ин ҳолат, качхатҳои моновариантии муайян карда мешаванд, ки дар сарбастии шаклҳои сохтори диаграммаи комплекси фазагии системаи бисёркомпонентии таҳқиқшаванда иштирок намеkunанд ва ҳамчун изофӣ рад карда мешаванд.

Майдонҳои дивариантии. Майдонҳои дивариантии дар СБК метавонанд дар натиҷаи транслятсияи качхатҳои моновариантии системаҳои ҷузъӣ ба минтақаи системаи умумӣ ба вучуд оянд. Ин раванд ба мо имкон медиҳад, ки муносибатҳои мураккаби фазагиро дар доираи системаҳои мураккаб дарк кунем. Масалан, майдонҳои аз ду фаза сери $AX+BX$, $AX+BY$ ва $BX+CX$ дар расми 4, ки дар натиҷаи транслятсияи качхатҳои моновариантии E_1^4 — E_2^4 , E_2^4 — E_3^4 и E_1^4 — E_4^4 ба минтақаи таркиби панҷкомпонента ба вучуд омадаанд, инчунин дар натиҷаи сарбаст шудани майдонҳо бо качхатҳои моновариантии, ки дар байни нуктаҳои нонвариантии системаи умумӣ мегузаранд.

Сохтани диаграммаҳои мувозинати фазагии СБК бо усули транслятсия марҳилаҳои асосии зеринро дар бар мегирад:

- муайян кардани нуктаҳои нонвариантии системаи умумӣ тавассути пайваст кардани нуктаҳои нонвариантии системаҳои қисман (ғайрияхела);
- муайян кардани нуктаҳои нонвариантии системаи умумӣ дар ҳолати транслятсияи якҷарафаи нуктаҳои нонвариантии системаҳои ҷузъӣ;
- тарҳи пешакии тасвири диаграммаи фазагии системаи таҳқиқшавандаи таркиби якум;
- санҷиши транслятсияи качхатҳои моновариантии системаҳои ҷузъӣ ба минтақаи таркиби умумӣ;
- ёфтани нуктаҳои имконпазири нонвариантии мобайнӣ, ки транслятсияи качхатҳои моновариантии системаҳои ҷузъиро ба минтақаи таркиби умумӣ таъмин меkunанд;
- сохтани диаграммаи комплекси фазагии СБК дар тақриби дурум;
- санҷиши зарурати транслятсияи нуктаҳои нонвариантии системаҳои ҷузъӣ ба минтақаи таркиби умумӣ дар зиёда аз як самт;
- санҷиши иштироки нуктаҳои нонвариантии системаи умумӣ дар сарбаст гардидани тасвирҳои геометрии система ва рад кардани нуктаҳои зиёдатӣ;
- санҷиши иштироки качхатҳои моновариантии системаи умумӣ дар сарбаст намудани тасвирҳои геометрии ва рад кардани качхатҳои зиёдатӣ;

- санҷиши мавҷудияти майдонҳои дивариантӣ, ки бо маҳдуд кардани сатҳҳо бо қачхатҳои моновариантӣ, ки дар байни нуқтаҳои нонвариантии системаи умумӣ мегузаранд;
- сохтани диаграммаи комплекси фазагии СБК дар варианти ниҳой.



Расми 4. – Транслятсияи шаклҳои геометрии фрагменти системаи А, В, С || X, Y - H₂O:
а) дутарафа; б) яктарафа; в) мобайнӣ

Таъкид кардан зарур аст, ки ҳангоми сохтани диаграммаҳои комплекси фазагии СБК, татбиқи ҳамаи марҳилаҳои дар боло зикршуда на ҳамеша ҳатмӣ мебошад. Масалан, агар ҳамаи нуқтаҳои нонвариантии системаҳои чузъӣ тавассути транслятсияи дутарафа ба минтакаи таркиби умумӣ интиқол ёбад, пас зарурати татбиқи транслятсияи яктарафа аз байн меравад. Имкон дорад, ки ҳамаи қачхатҳои моновариантии системаҳои чузъӣ тавассути транслятсияи дутарафа ва яктарафа интиқол гардад ва дар минтакаи таркиби умумӣ сарбаст шаванд. Дар ин сурат, зарурати ҷустуҷӯи нуқтаҳои мобайнии нонвариантӣ аз байн меравад ва амсоли инҳо.

Политермаи диаграммаи комплекси фазагии системаи Na⁺, Ca²⁺ || SO₄²⁻, CO₃²⁻, HCO₃⁻ – H₂O. Дар маҳлулҳои обии системаи таҳқиқшаванда катионҳои Na⁺, Ca²⁺ ва анионҳои SO₄²⁻, CO₃²⁻, HCO₃⁻ мавҷуданд, яъне 5 ион. Аз ин рӯ, он системаи панҷкомпонента мебошад.

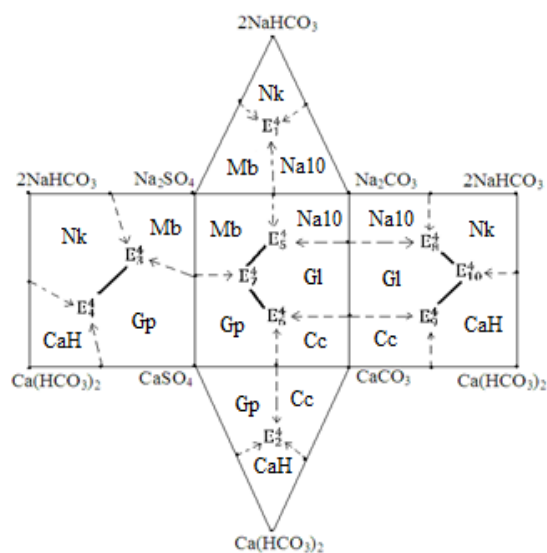
Системаи панҷкомпонентаи таҳқиқшаванда 5 зерсистемаи чоркомпонентаро дар бар мегирад: 4Na⁺–SO₄²⁻–CO₃²⁻–HCO₃⁻–H₂O; 3Ca²⁺–SO₄²⁻–CO₃²⁻–2HCO₃⁻–H₂O; Na⁺, Ca²⁺ || SO₄²⁻, CO₃²⁻–H₂O; Na⁺, Ca²⁺ || SO₄²⁻, HCO₃⁻–H₂O; Na⁺, Ca²⁺ || CO₃²⁻, HCO₃⁻–H₂O. Ду системаи аввал намакхоро бо иони умумӣ дар бар мегиранд. Байни онҳо реаксияи муовиза вучуд надорад. Аз ин рӯ, барои онҳо шумораи чузъҳои таркибӣ (3 намак ва об) метавонанд компонент бошанд. Дар се системаи дигар реаксияи муовиза ба амал меояд.

Усули транслятсия, ки аз ҷониби яке аз асосгузори риштаи асосҳои таҳлили физико-химиявӣ, асосгузори мактаби илмии омӯзиши системаҳои бисёркомпонента бо усули транслятсия, профессор Лутфулло Солиев таҳия шудааст, нишон дод, ки системаи Na⁺, Ca²⁺ || SO₄²⁻, CO₃²⁻, HCO₃⁻ – H₂O дар сатҳи таркиби чоркомпонента бо нуқтаҳои нонвариантии зерин ва таркиби фазагии мувофиқи таҳшинҳо (ҷадвали 2) тавсиф меёбад.

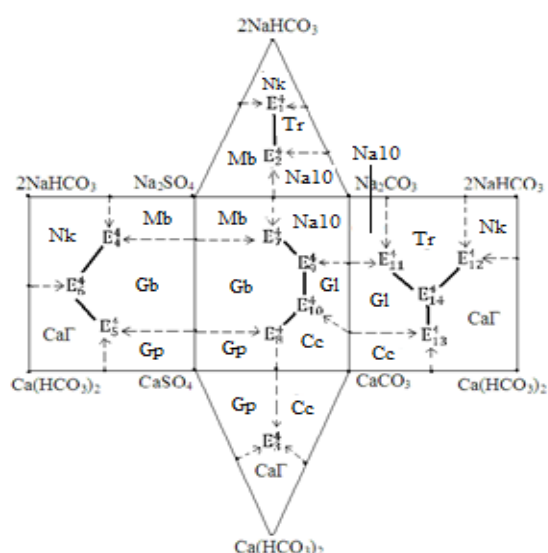
Чадвали 2. – Нуқтаҳои нонвариантии чорчандаи системаи Na^+ , $\text{Ca}^{2+}||\text{SO}_4^{2-}$, CO_3^{2-} , HCO_3^- - H_2O дар ҳудуди ҳароратҳои $0 \div 100^\circ\text{C}$

Изотерма, $^\circ\text{C}$	Нуқтаҳои нонварианти	Фазаҳои саҳти мувозинатӣ	Нуқтаҳои нонварианти	Фазаҳои саҳти мувозинатӣ
1	2	3	4	5
0 $^\circ\text{C}$	E_1^4	$\text{Mb} + \text{Na10} + \text{Nk}$	E_2^4	$\text{Gp} + \text{CaH} + \text{Cc}$
	E_3^4	$\text{Mb} + \text{Nk} + \text{Gp}$	E_4^4	$\text{Nk} + \text{Gp} + \text{CaH}$
	E_5^4	$\text{Na10} + \text{Mb} + \text{Gl}$	E_6^4	$\text{Cc} + \text{Gp} + \text{Gl}$
	E_7^4	$\text{Mb} + \text{Gl} + \text{Gp}$	E_8^4	$\text{Na10} + \text{Gl} + \text{Nk}$
	E_9^4	$\text{Gl} + \text{Cc} + \text{CaH}$	E_{10}^4	$\text{Gl} + \text{Nk} + \text{CaH}$
25 $^\circ\text{C}$	E_1^4	$\text{Nk} + \text{Mb} + \text{Tr}$	E_2^4	$\text{Mb} + \text{Tr} + \text{Na10}$
	E_3^4	$\text{Gp} + \text{CaG} + \text{Cc}$	E_4^4	$\text{Nk} + \text{Mb} + \text{Gb}$
	E_5^4	$\text{CaH} + \text{Gb} + \text{Gp}$	E_6^4	$\text{Gb} + \text{Nk} + \text{CaH}$
	E_7^4	$\text{Mb} + \text{Na10} + \text{Gb}$	E_8^4	$\text{Gb} + \text{Gb} + \text{Cc}$
	E_9^4	$\text{Gb} + \text{Na10} + \text{Gl}$	E_{10}^4	$\text{Gl} + \text{Gb} + \text{Cc}$
	E_{11}^4	$\text{Na10} + \text{Tr} + \text{Gl}$	E_{12}^4	$\text{Tr} + \text{Nk} + \text{CaH}$
	E_{13}^4	$\text{Cc} + \text{Gl} + \text{CaH}$	E_{14}^4	$\text{Tr} + \text{CaH} + \text{Gl}$
50 $^\circ\text{C}$	E_1^4	$\text{Te} + \text{Nk} + \text{Br}$	E_2^4	$\text{Br} + \text{Tr} + \text{Na1}$
	E_3^4	$\text{Nk} + \text{Br} + \text{Tr}$	E_4^4	$\text{CaH} + \text{Gp} + \text{Cc}$
	E_5^4	$\text{CaH} + \text{Nk} + \text{Te}$	E_6^4	$\text{CaH} + \text{Gb} + \text{Gp}$
	E_7^4	$\text{CaH} + \text{Gb} + \text{Te}$	E_8^4	$\text{Gb} + \text{Te} + \text{Br}$
	E_9^4	$\text{Gp} + \text{Gb} + \text{Cc}$	E_{10}^4	$\text{Br} + \text{Na1} + \text{Pr}$
	E_{11}^4	$\text{Cc} + \text{Gb} + \text{Pr}$	E_{12}^4	$\text{Gb} + \text{Pr} + \text{Cc}$
	E_{13}^4	$\text{Na1} + \text{Pr} + \text{Tr}$	E_{14}^4	$\text{Cc} + \text{Pr} + \text{CaH}$
	E_{15}^4	$\text{Tr} + \text{Nk} + \text{CaH}$	E_{16}^4	$\text{Pr} + \text{Tr} + \text{CaH}$
75 $^\circ\text{C}$	E_1^4	$\text{Te} + \text{Nk} + \text{Br}$	E_2^4	$\text{Na1} + \text{Tr} + \text{Br}$
	E_3^4	$\text{Nk} + \text{Tr} + \text{Br}$	E_4^4	$\text{Gp} + \text{Cc} + \text{CaH}$
	E_5^4	$\text{Nk} + \text{Te} + \text{Gb}$	E_6^4	$\text{CaH} + 5\text{Ca} \cdot \text{Na} \cdot 3 + \text{Gp}$
	E_7^4	$\text{Nk} + \text{CaH} + \text{Gb}$	E_8^4	$\text{CaH} + \text{Gb} + 5\text{Ca} \cdot \text{Na} \cdot 3$
	E_9^4	$\text{Te} + \text{Br} + \text{Gb}$	E_{10}^4	$\text{Na1} + \text{Br} + \text{Pr}$
	E_{11}^4	$\text{Gb} + \text{Cc} + 5\text{Ca} \cdot \text{Na} \cdot 3$	E_{12}^4	$5\text{Ca} \cdot \text{Na} \cdot 3 + \text{Gb} + \text{Br}$
	E_{13}^4	$5\text{Ca} \cdot \text{Na} \cdot 3 + \text{Pr} + \text{Cc}$	E_{14}^4	$\text{Br} + \text{Pr} + 5\text{Ca} \cdot \text{Na} \cdot 3$
	E_{15}^4	$\text{Na1} + \text{Tr} + \text{Pr}$	E_{16}^4	$\text{Tr} + \text{Nk} + \text{CaH}$
	E_{17}^4	$\text{Pr} + \text{CaH} + \text{Cc}$	E_{18}^4	$\text{Tr} + \text{Pr} + \text{CaH}$
100 $^\circ\text{C}$	E_1^4	$\text{Te} + \text{Nk} + 3\text{Na} \cdot \text{C}$	E_2^4	$\text{Br} + \text{Tr} + \text{Na1}$
	E_3^4	$\text{Te} + \text{Br} + \text{Tr}$	E_4^4	$\text{Te} + \text{Tr} + 3\text{Na} \cdot \text{C}$
	E_5^4	$\text{CaH} + \text{Gp} + \text{Cc}$	E_6^4	$\text{Nk} + \text{Te} + \text{Gb}$
	E_7^4	$\text{CaH} + \text{Gb} + \text{Gp}$	E_8^4	$\text{CaH} + \text{Gb} + \text{Nk}$
	E_9^4	$\text{Gb} + \text{Te} + \text{Br}$	E_{10}^4	$\text{Br} + \text{Pr} + \text{Na1}$
	E_{11}^4	$\text{Gp} + \text{Gb} + \text{Cc}$	E_{12}^4	$\text{Cc} + \text{Gb} + \text{Pr}$
	E_{13}^4	$\text{Gb} + \text{Pr} + \text{Br}$	E_{14}^4	$\text{Na1} + \text{Pr} + \text{Tr}$
	E_{15}^4	$\text{Cc} + \text{Pr} + \text{CaH}$	E_{16}^4	$3\text{Na} \cdot \text{C} + \text{Nk} + \text{CaH}$
	E_{17}^4	$\text{Pr} + \text{Tr} + 3\text{Na} \cdot \text{C}$	E_{18}^4	$\text{Pr} + 3\text{Na} \cdot \text{C} + \text{CaH}$

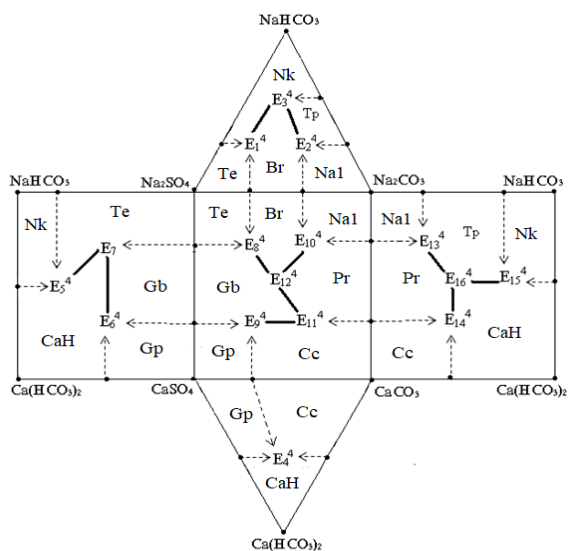
Чӣ хеле, ки аз чадвали 2 дида мешавад, миқдори нуқтаҳои нонвариантии дар изотермаҳо гуногун мебошанд. Ин аз навъи система ва хосиятҳои моддаҳои қисмҳои таркибиашон вобастагӣ дорад. Дар асоси далелҳои чадвали 2 сатҳи таркиби чоркомпонентаи призмаи кушодаи диаграммаи комплекси фазагии системаи иборат аз катионҳои натрий, калсий ва анионҳои сулфат, карбонат, гидрокарбонат сохта шуда, дар расми 5 оварда шудааст. Дар призмаи кушода шаклҳои геометрии қисми намакҳои системаи таҳқиқшаванда ифодаи худро ёфтаанд.



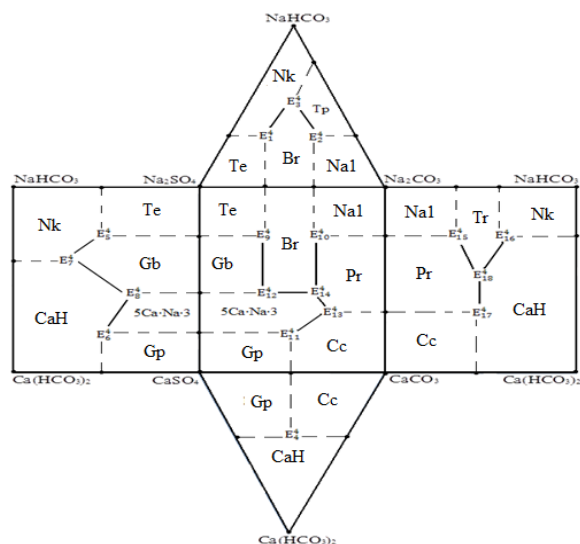
а)



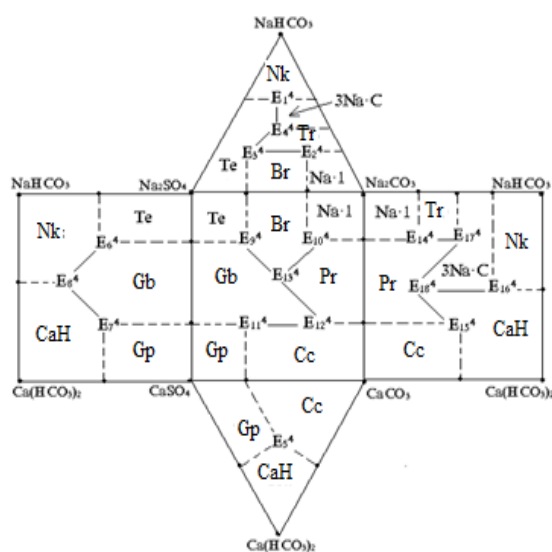
б)



в)



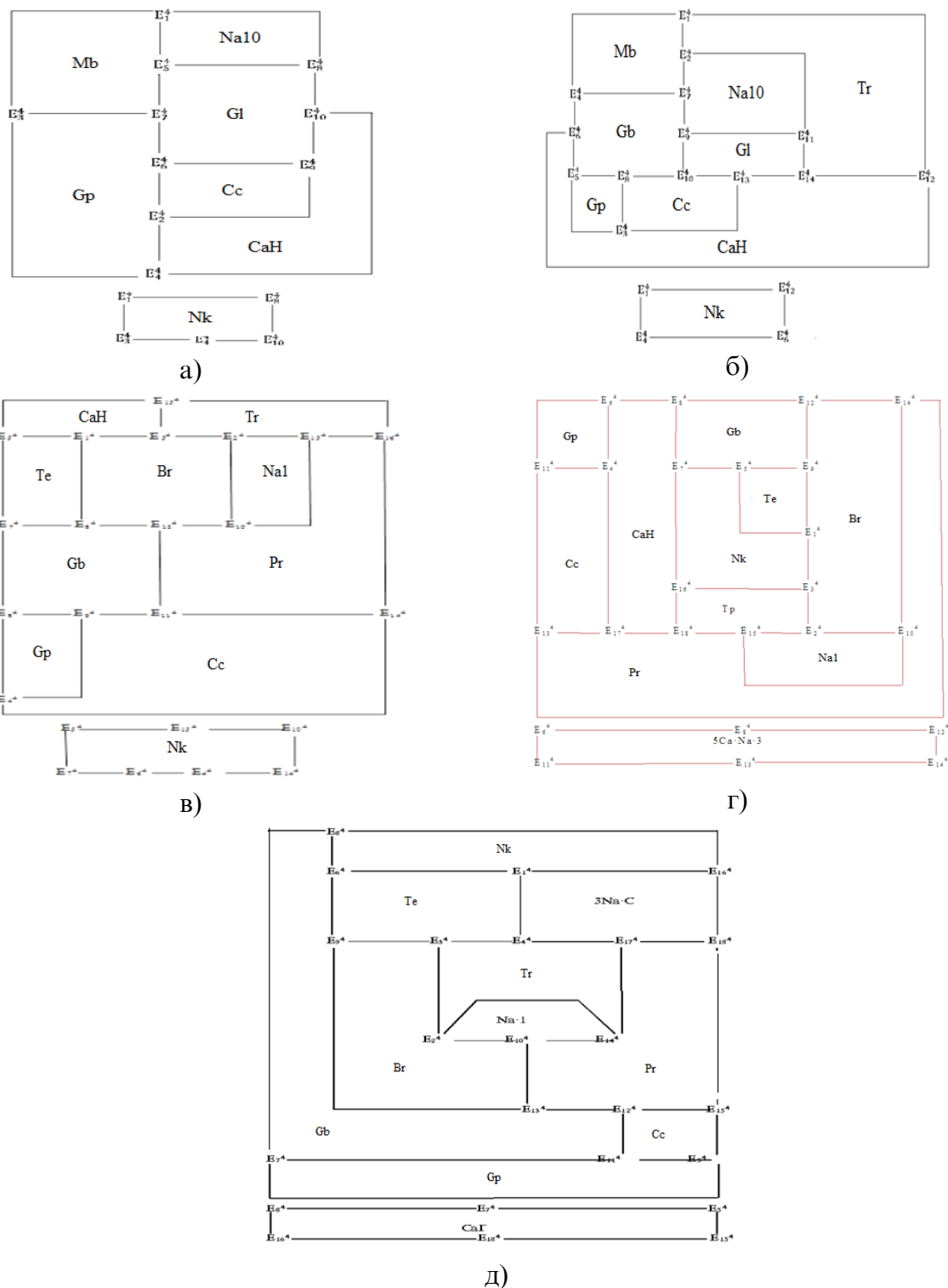
г)



д)

Расми 5. – Изотермаҳои призмаи кушодаи чорчандаи системаи $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+} \parallel \text{CO}_3^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$: а) 0 °C; б) 25 °C; в) 50 °C; г) 75 °C; д) 100 °C

Барои соддагардони минбаъда диаграммаҳои дар расми 5 овардашуда, масалан, муттаҳид кардани майдонҳои якхелаи кристаллизатсияи фазаҳои сахтҳои мувозинатӣ, онро метавон дар намуди диаграммаи муттаҳидшуда пешниҳод кард. Диаграммаҳои муттаҳидшудаи расми 6 иттилооти пурраи мавҷудияти ҳамаи тасвириҳои геометрӣ, ҷойгиршавии мутақобилаи онҳо ва таркиби фазаҳои сахтҳои мувозинатӣ нигоҳ дошта мешавад. Чунин диаграммаҳо метавонанд асос барои тасвири системаи таҳқиқшаванда дар сатҳи поликомпонентӣ бо усули транслятсия гарданд, яъне тадбиқи принципи мутақобилати ифодаҳои сохтори системаҳои ҷузъӣ ва умумӣ дар як диаграмма.



Расми 6. – Шабли муттаҳидшудаи диаграммаи сатҳи таркиби чорҷандаи системаи Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{CO}_3^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$: а) 0 °C; б) 25 °C; в) 50 °C; г) 75 °C; д) 100 °C

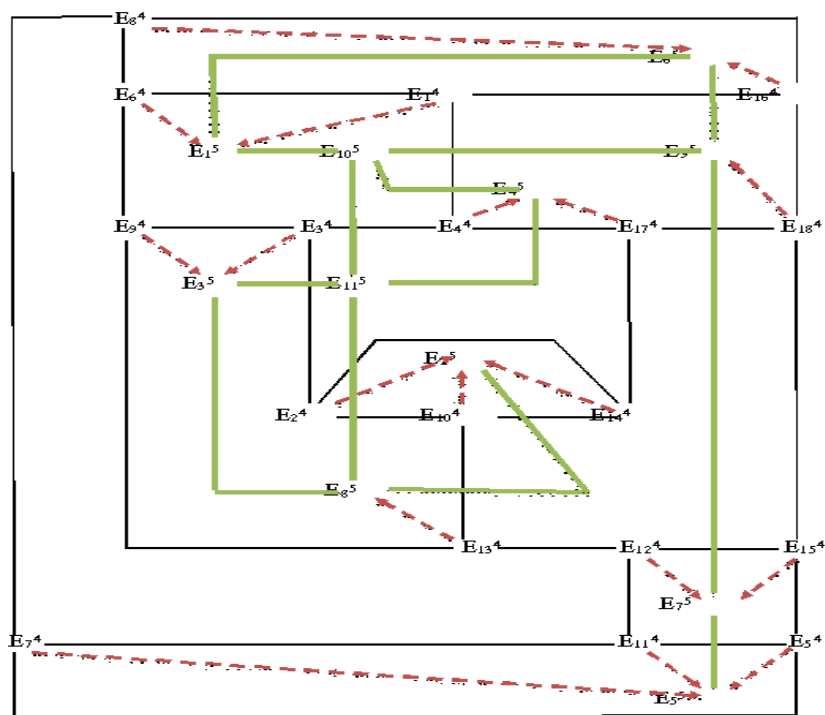
Дар асоси ҷадвали 2 дар системаи панҷкомпонентаи Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, CO_3^{2-} , HCO_3^- - H_2O политермаи сатҳи таркиби чоркомпонента, 76 нуктаи нонварианти мавҷуд аст. Истифодаи усули транслятсияи «сетарафа», «дутафа» ва «мобайнӣ» нишон медиҳад, ки дар сатҳи таркиби панҷкомпонента онҳо нуктаҳои нонвариантии зеринро ба вуҷуд меоранд, ки тарзи ҳосилшавиашон дар ҷадвали 3 ифода гардидаанд.

Ҷадвали 3. – Транслятсияи нуктаҳои нонвариантии ҷузъӣ ба сатҳи умумии политермаи системаи Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, CO_3^{2-} , HCO_3^- - H_2O

Ифодаҳои геометрии транслятсияшаванда	Нуктаҳои нонвариантии ҳосилшаванда	Ҷазаҳои саҳти мувозинатӣ	Навъи транслятсия
Изотермаи 0 °C			
E_1^4, E_5^4, E_8^4	E_1^5	$\text{Nk} + \text{Mb} + \text{Na}_{10} + \text{Gl}$	Сетарафа
E_3^4, E_7^4	E_2^5	$\text{Nk} + \text{Mb} + \text{Gp} + \text{Gl}$	Дутарафа
E_4^4, E_{10}^4	E_3^5	$\text{Nk} + \text{CaH} + \text{Gp} + \text{Gl}$	Дутарафа
E_6^4, E_2^4, E_9^4	E_4^5	$\text{Gp} + \text{Cc} + \text{CaG} + \text{Gl}$	Сетарафа
Изотермаи 25 °C			
E_1^4, E_{12}^4	E_1^5	$\text{Mb} + \text{Nk} + \text{Tr} + \text{CaH}$	Дутарафа
E_2^4, E_{11}^4	E_2^5	$\text{Mb} + \text{Tr} + \text{Na}_{10} + \text{Gl}$	Дутарафа
E_4^4, E_7^4	E_3^5	$\text{Gb} + \text{Mb} + \text{Nk} + \text{Na}_{10}$	Дутарафа
E_3^4, E_5^4, E_8^4	E_4^5	$\text{Gp} + \text{Gb} + \text{CaH} + \text{Cc}$	Сетарафа
E_{10}^4, E_{13}^4	E_5^5	$\text{Gb} + \text{Gl} + \text{Cc} + \text{CaH}$	Дутарафа
E_6^4, Na_{10}	E_6^5	$\text{Gb} + \text{Nk} + \text{CaH} + \text{Na}_{10}$	Яктарафа
E_9^4, CaH	E_7^5	$\text{Gb} + \text{Gl} + \text{Na}_{10} + \text{CaH}$	Яктарафа
E_{14}^4, Mb	E_8^5	$\text{Gl} + \text{Tr} + \text{CaH} + \text{Mb}$	Яктарафа
	E_9^5	$\text{Mb} + \text{Nk} + \text{CaH} + \text{Na}_{10}$	Мобайнӣ
	E_{10}^5	$\text{Na}_{10} + \text{Gl} + \text{Mb} + \text{Nk}$	Мобайнӣ
	E_{11}^5	$\text{Gl} + \text{Na}_{10} + \text{CaH} + \text{Mb}$	Мобайнӣ
Изотермаи 50 °C			
E_1^4, E_3^4	E_1^5	$\text{Te} + \text{Nk} + \text{Br} + \text{CaH}$	Дутарафа
$E_2^4, E_{10}^4, E_{13}^4$	E_2^5	$\text{Br} + \text{Na}_1 + \text{Tr} + \text{Pr}$	Сетарафа
E_3^4, E_{15}^4	E_3^5	$\text{Nk} + \text{Tr} + \text{Br} + \text{CaH}$	Дутарафа
E_4^4, E_6^4, E_9^4	E_4^5	$\text{Gp} + \text{Cc} + \text{CaH} + \text{Gb}$	Сетарафа
E_7^4, E_8^4	E_5^5	$\text{CaH} + \text{Te} + \text{Gb} + \text{Br}$	Дутарафа
E_{11}^4, E_{14}^4	E_6^5	$\text{Cc} + \text{Gb} + \text{Pr} + \text{CaH}$	Дутарафа
E_{12}^4, CaH	E_7^5	$\text{Pr} + \text{Gb} + \text{Br} + \text{CaH}$	Яктарафа
E_{16}^4, Br	E_8^5	$\text{Tr} + \text{Pr} + \text{CaH} + \text{Br}$	Яктарафа
Изотермаи 75 °C			
E_1^4, E_5^4, E_9^4	E_1^5	$\text{Te} + \text{Nk} + \text{Br} + \text{Gb}$	Сетарафа
$E_2^4, E_{10}^4, E_{15}^4$	E_2^5	$\text{Na}_1 + \text{Tr} + \text{Br} + \text{Pr}$	Сетарафа
E_4^4, E_6^4, E_{11}^4	E_3^5	$\text{Gp} + \text{CaH} + \text{Cc} + 5\text{Ca} \cdot \text{Na} \cdot 3$	Сетарафа
E_7^4, E_{16}^4	E_4^5	$\text{Tr} + \text{Nk} + \text{Br} + \text{CaH}$	Дутарафа
E_8^4, E_{12}^4	E_5^5	$\text{CaH} + \text{Gb} + 5\text{Ca} \cdot \text{Na} \cdot 3 + \text{Br}$	Дутарафа
E_{13}^4, E_{17}^4	E_6^5	$\text{Pr} + \text{CaH} + 5\text{Ca} \cdot \text{Na} \cdot 3 + \text{Cc}$	Дутарафа
$E_3^4, 5\text{Ca} \cdot \text{Na} \cdot 3$	E_7^5	$\text{Nk} + \text{Tr} + 5\text{Ca} \cdot \text{Na} \cdot 3 + \text{Br}$	Яктарафа
E_{14}^4, Tr	E_8^5	$\text{Br} + \text{Pr} + 5\text{Ca} \cdot \text{Na} \cdot 3 + \text{Tr}$	Яктарафа
E_{18}^4, Br	E_9^5	$\text{Tr} + \text{Pr} + \text{CaH} + \text{Br}$	Яктарафа
Изотермаи 100 °C			
E_1^4, E_6^4	E_1^5	$\text{Nk} + \text{Te} + 3\text{Na} \cdot \text{C} + \text{Gb}$	Дутарафа
$E_2^4, E_{10}^4, E_{14}^4$	E_2^5	$\text{Br} + \text{Tr} + \text{Na} \cdot 1 + \text{Pr}$	Сетарафа
E_3^4, E_9^4	E_3^5	$\text{Br} + \text{Te} + \text{Tr} + \text{Gb}$	Дутарафа
E_4^4, E_{17}^4	E_4^5	$3\text{Na} \cdot \text{C} + \text{Te} + \text{Tr} + \text{Pr}$	Дутарафа
E_5^4, E_7^4, E_{11}^4	E_5^5	$\text{Gp} + \text{Cc} + \text{CaH} + \text{Gb}$	Сетарафа
E_8^4, E_{16}^4	E_6^5	$\text{CaH} + \text{Nk} + \text{Gb} + 3\text{Na} \cdot \text{C}$	Дутарафа
E_{12}^4, E_{15}^4	E_7^5	$\text{Gb} + \text{Pr} + \text{Cc} + \text{CaH}$	Дутарафа
E_{13}^4, Tr	E_8^5	$\text{Gb} + \text{Br} + \text{Pr} + \text{Tr}$	Яктарафа
E_{18}^4, Gb	E_9^5	$\text{Pr} + 3\text{Na} \cdot \text{C} + \text{CaH} + \text{Gb}$	Яктарафа
	E_{10}^5	$\text{Te} + 3\text{Na} \cdot \text{C} + \text{Gb} + \text{Pr}$	Мобайнӣ
	E_{11}^5	$\text{Te} + \text{Tr} + \text{Gb} + \text{Pr}$	Мобайнӣ

The diagram shows a directed graph with 18 nodes, labeled $E_1^4, E_2^4, E_3^4, E_4^4, E_5^4, E_6^4, E_7^4, E_8^4, E_9^4, E_{10}^4, E_{11}^4, E_{12}^4, E_{13}^4, E_{14}^4, E_{15}^4, E_{16}^4, E_{17}^4$ and $E_1^5, E_2^5, E_3^5, E_4^5, E_5^5, E_6^5, E_7^5, E_8^5, E_9^5, E_{10}^5, E_{11}^5, E_{12}^5, E_{13}^5, E_{14}^5, E_{15}^5, E_{16}^5, E_{17}^5, E_{18}^5$. The nodes are arranged in a grid-like structure. Green edges connect nodes at the same level (e.g., $E_1^4 \rightarrow E_2^4 \rightarrow \dots \rightarrow E_{18}^4$ and $E_1^5 \rightarrow E_2^5 \rightarrow \dots \rightarrow E_{18}^5$). Red edges connect nodes at different levels (e.g., $E_1^4 \rightarrow E_1^5, E_2^4 \rightarrow E_2^5, \dots, E_{18}^4 \rightarrow E_{18}^5$). Purple arrows indicate specific flow directions or weights (e.g., $E_1^4 \rightarrow E_2^5, E_2^4 \rightarrow E_3^5, \dots, E_{18}^4 \rightarrow E_{19}^5$).

23



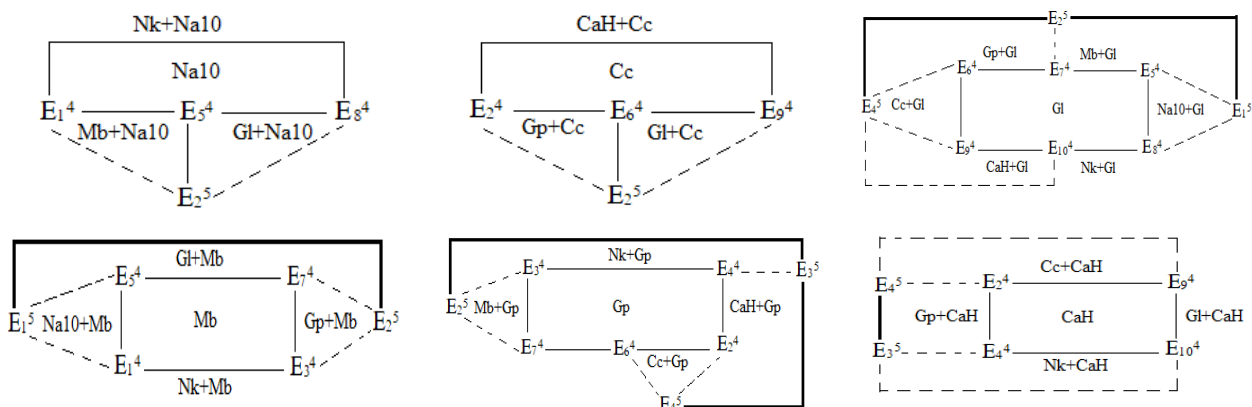
д)

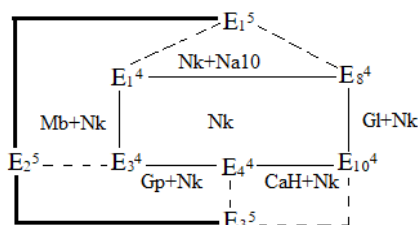
Расми 7. – Политермаи диаграммаи комплекси фазагии сатҳи чор-панҷкомпонентаи системаи Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, CO_3^{2-} , HCO_3^- - H_2O дар диапозонаи ҳароратҳои $0 \div 100$ °C:
а) 0 °C; б) 25 °C; в) 50 °C; г) 75 °C; д) 100 °C

Таҳлили политермаи диаграммаҳои системаи таҳқиқшаванда дар диапозонаи ҳароратҳои $0 \div 100$ °C нишон медиҳад, ки дар изотермаҳои алоҳидаи комплекси фазагӣ тағйироти фазагӣ ба назар мерасад, ки он вобаста ба қонуниятҳои асосҳои таҳлили физико-химиявӣ ва қоидаи фазаҳои Гиббс сохтори диаграммаҳо мураккаб менамояд. Мисол, дар диаграммаи изотермии системаи мазкур дар 0 °C мушоҳида мешавад, ки фазаи мувозинатии гейлюссит қисми бештарин майдонҳои кристаллизатсияи муштаракро бо дигар фазаҳо ташкил медиҳанд - мутаносибан 6 ва 5. Ин аз он шаҳодат медиҳад, ки майдонҳои кристаллизатсияи ин пайваستاгӣҳо дар шароити додашуда қисми назарраси системаи таҳқиқшавандаро ишғол мекунанд.

Ҳангоми ҳалли масъалаҳои мушаххаси амалӣ, диаграммаи комплекси фазагии системаи панҷкомпонентаи таҳқиқшаванда, ки бо усули транслятсия сохта шудааст, метавонад аз рӯйи минтақаҳои кристаллизатсияи пайваستاгӣҳои инфиродӣ дар ҳама сатҳҳои вариантҳои система фрагментатсия карда шавад.

Дар расми 8 фрагментҳои изотермаи 0 °C-и комплекси фазагии системаи Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, CO_3^{2-} , HCO_3^- - H_2O дар минтақаи парагенези як фаза бо дигар намакҳо, оварда шудааст.





Расми 8. – Системаи Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, CO_3^{2-} , HCO_3^- - H_2O дар 0°C . Фрагментатсияи диаграммаи комплекси фазагӣ ҳудуди парагенези як фаза бо дигар намакҳо

Фрагментатсияи диаграммаи комплекси фазагӣ, ки бо усули транслятсия сохта шудаанд, имкон медиҳад, ки роҳҳои кристаллизатсияи намакҳо дар системаҳои бисёркомпонента дар асоси таркиби онҳо ва фазаҳои саҳти ибтидоии ҷудошуда таҳлил ва пешгӯӣ карда шавад.

Политермаи ҳалшавандагии системаи Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, CO_3^{2-} , HCO_3^- - H_2O дар сатҳи чоркомпонентагии таркиб

Таҳқиқи эксперименталии системаҳои химиявӣ талаб менамояд, ки барои омӯзиши ҳалшавандагӣ дар системаҳои химиявӣ дар ҳар 10 % концентратсия таҷриба гузошта, он натиҷагирӣ карда шавад. Чунин тарзи таҳқиқ дар баробари реактиви химиявии бисёр, боз вақти зиёдро низ талаб менамояд. Пешгӯиҳои комплекси фазагии СБК бо усули транслятсия имкон медиҳад мавод ва вақт барои гузаронидани эксперимент сарфа гардад. Чунки диаграммаҳои системаҳои химиявӣ имкон медиҳад параметрҳои имконпазирӣ концентратсионӣ муайян карда шавад ва парагенезҳои фазаҳои саҳти мувозинатӣ барои хатҳо, майдонҳо ва нуқтаҳо ёфта шавад.

Ҳалшавандагии компонентҳо дар системаҳои химиявии обӣ. Об ҳалкунандаи универсалий ба шумор меравад. Дар он моддаҳои ҳолати агрегативон саҳт, моеъ ва газҳо ҳал мешаванд. Ҳалшавандагии пайвастагҳои химиявӣ дар се марҳила гузашта, инчунин он аз ҳолати агрегативон моддаҳо вобастагӣ надорад, ки ин марҳилаҳо: аз ҳисоби қувваи кашиши молекулаи об бандҳои химиявии таркиби моддаи ҳалшаванда канда мешаванд; аз ҳисоби қувваи кашиши молекулаи об бандҳои молекулаи об ва моддаи ҳалшаванда банди нав ҳосил мешавад ва дар муҳити обӣ паҳншавии моддаҳои навӣ ҳосилшуда.

Дар ҷадвали 4 хосиятҳои маҳлулҳо, омехтаҳои механикӣ ва моддаҳои химиявӣ оварда шудааст.

Ҷадвали 4. – Таъсфи омехтаҳои механикӣ, пайвастҳои химиявӣ ва маҳлулҳо

Хосият	Омехтаи механикӣ	Пайвастҳои химиявӣ	Маҳлулҳо
Таркиб	Тағйирнопазир	Тибқи қонуни доимияти таркиб	Тағйирпазир
Таносуби компонентҳо	Таносуби гуногун	Тибқи қонуни эквивалентҳо, нисбатҳои қаратии яқлұхт	Таносуби васеъ
Банди химиявӣ	Нест	Устувор, энергияи банд 70-418,7 кҶ/мол	Ноустувор, энергияи банд 20,9-125,6 кҶ/мол
Қонуни нигоҳдории массаи модда ва энергия	Итоат менамояд	Итоат менамояд	Итоат менамояд
Хосиятҳои қисмҳои таркибӣ	Бо нигоҳ доштани хосияти индивидуалӣ	Хосияти индивидуалӣ аз байн рафта, хосиятҳои нав пайдо мегардад	Хосиятҳои индивидуалӣ аз байн рафта, хосиятҳои нав пайдо мешавад

Об ҳангоми ҳалшавии моддаҳои ҳолати агрегетиашон саҳт ба панҷараи кристаллиашон таъсир расонида, онҳоро вайрон менамояд. Мисол панҷараи ионии намакҳо ё моддаҳои соддаеро, ки дар шакли молекулаанд.

Политермаи ҳалшавандагии системаи $5\text{Na}^+ - \text{SO}_4^{2-} - \text{CO}_3^{2-} - \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$. Партовҳои моеъи регенератсияи криолити заводи алюминий фторидҳо, карбонатҳо, гидрокарбонатҳо ва сульфатҳои натрий, калсий ва алюминий доранд. Равандҳои кристаллизатсия ва ҳалшавандагии намакҳо дар маҳлулҳои обии ин партовҳо бо қонуниятҳои мувозинатҳои фазагӣ дар шакли системаи шашкомпонентаи $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+} || \text{SO}_4^{2-}, \text{CO}_3^{2-}, \text{HCO}_3^-, \text{F}^- - \text{H}_2\text{O}$, системаҳои панҷ- ва чоркомпонентаи онро ташкилқунанда муайян карда мешаванд.

Фазаҳои саҳти мувозинатии системаи таҳқиқшаванда дар фосилаи ҳароратҳои $0 \div 100$ °C инҳоянд: $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ – мирабилит (Mb); $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ – Na10; NaHCO_3 – нахколит (Nk). Барои таҷрибаҳо реактивҳои зерин истифода шуданд: $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ (навъи – «хч»); Na_2CO_3 (навъи – «ч»); NaHCO_3 (навъи – «ч») истифода гардида, натиҷаи ҳалшавандагии шаклҳои геометрии он муайян карда шудааст.

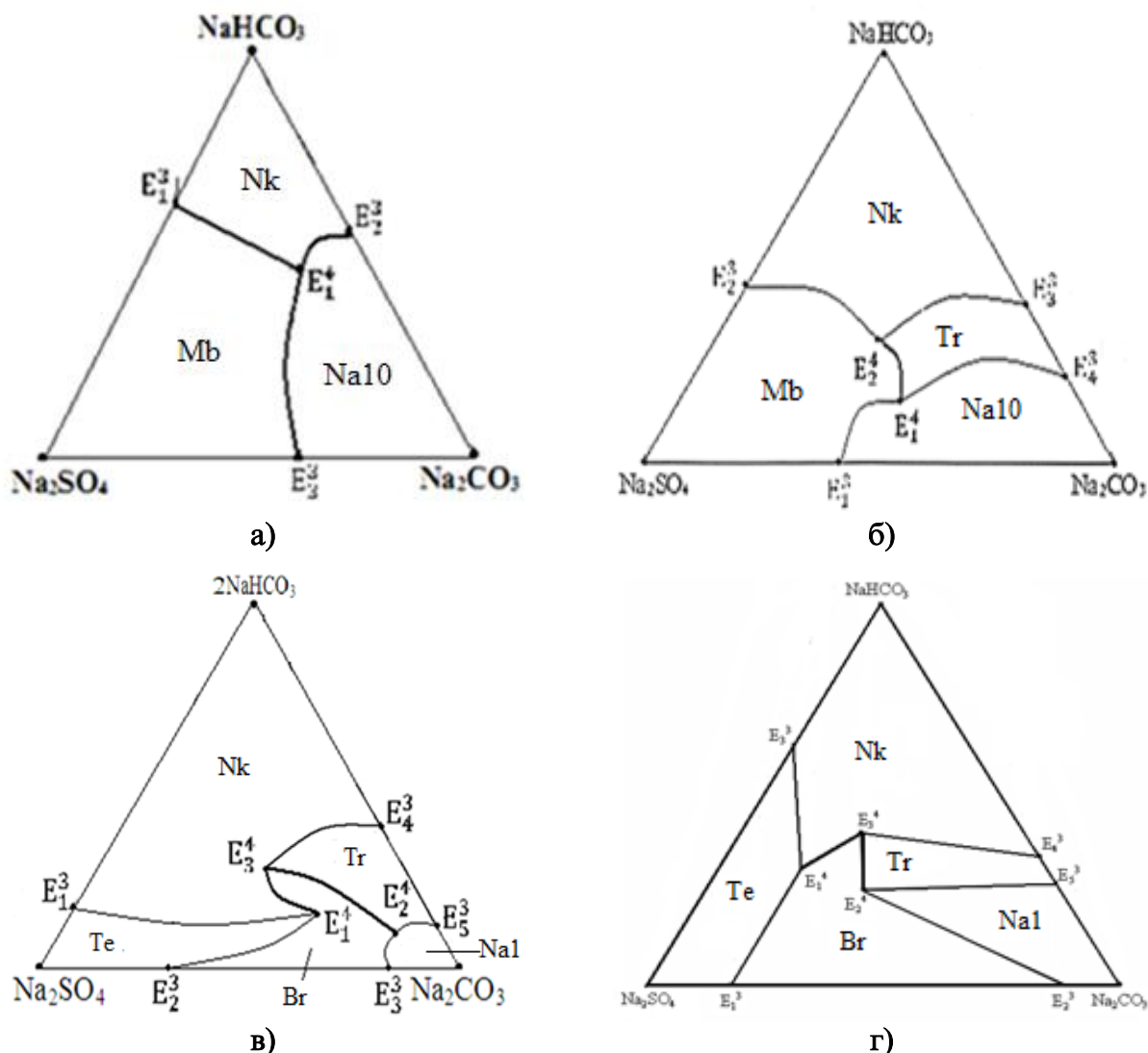
Дар ҷадвали 5 маълумот оид ба ҳалшавии пайвастаҳои инфиродӣ, инчунин дар нуқтаҳои нонвариантии система барои сатҳи таркиби секомпонента, ки аз маълумотномаҳои ҳалшавандагӣ гирифта шудаанд ва барои сатҳи таркиби чоркомпонента, ки аз ҷониби мо ба даст омадаанд, пешниҳод шудаанд.

Ҷадвали 5. – Политермаи ҳалшавии системаи $5\text{Na}^+ - \text{SO}_4^{2-} - \text{CO}_3^{2-} - \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$ дар 0 °C

№ нуқта	Таркиби фазаи моеъ, мас.%				Фазаҳои саҳти мувозинатӣ
	Na_2SO_4	Na_2CO_3	NaHCO_3	H_2O	
1	2	3	4	5	6
Изотермаи 0 °C					
E_1^3	2.73	-	5.58	91.69	Mb + Nk
E_2^3	-	5.60	4.6	89.80	Nk + Na10
E_3^3	2.80	6.00	-	91.20	Na10 + Mb
E_1^4	2.12	5.13	4.37	88.38	Mb + Tr + Na10
Изотермаи 25 °C					
E_1^3	16.40	18.30	-	65.30	Mb+Na10
E_2^3	20.68	-	4.16	75.16	Nk+Mb
E_3^3	-	17.62	4.62	77.76	Tr+Nk
E_4^3	-	22.46	2.84	74.70	Na10+Tr
E_1^4	21.20	20.07	5.51	50.22	Mb+Tr+Na10
E_2^4	20.90	22.54	4.77	50.68	Nk+Tr+Mb
Изотермаи 50 °C					
E_1^3	29.65	-	4.05	66.30	Te+Nk
E_2^3	22.47	10.52	-	67.61	Te+Br
E_3^3	5.87	28.52	-	65.61	Br+Na1
E_4^3	-	16.92	6.30	76.78	Nk+Tr
E_5^3	-	31.80	0.85	67.35	Tr+Na1
E_1^4	12.64	21.31	2.51	54.76	Te+Nk+Br
E_2^4	4.30	24.36	0.64	58.03	Br+Tr+Na1
E_3^4	7.52	9.14	3.24	60.08	Tr+Nk+Br
Изотермаи 75 °C					
E_1^3	25.00	6.40	-	88.20	Te+Br
E_2^3	3.80	28.90	-	67.30	Br+ Na1
E_3^3	7.90	-	12.72	79.38	Te+Nk
E_4^3	-	17.01	9.05	73.94	Tr+Nk

Хотимаи ҷадвали 5					
1	2	3	4	5	6
E_5^3	-	30.40	10.91	58.69	Na1+Tr
E_1^4	17.40	6.08	10.23	66.29	Te+Nk+Br
E_2^4	20.13	16.28	11.54	52.05	Na1+Br+Tr
E_3^4	20.28	15.72	13.45	50.55	Br+Tr+Nk

Дар асоси маълумоти ҷадвали 5, аз ҷониби мо изотермаҳои диаграммаи ҳалшавии системаи чоркомпонентаи $5\text{Na}^+-\text{SO}_4^{2-}-\text{CO}_3^{2-}-\text{HCO}_3^--\text{H}_2\text{O}$ сохта шуд, ки дар расми 9 қисми беоби он нишон дода шудааст.



Расми 9. – Политермаи қисми беоби диаграммаи ҳолатии системаи $5\text{Na}^+-\text{SO}_4^{2-}-\text{CO}_3^{2-}-\text{HCO}_3^--\text{H}_2\text{O}$: а) 0 °C; б) 25 °C; в) 50 °C; д) 75 °C

Аз диаграммаҳои расми 9 мушоҳида мешавад, ки баландшавии ҳарорат дар баробари зиёд намудани ҳалшавандагӣ, инчунин ба ҳосилшавии фазаи нав сабаб мегардад, ки ин ба мураккабшавии сохтори диаграмма меоварад, ки онро дар мисоли аз 0 то 25 фазаи трона, аз 25 то 50 °C фазаи беркеит дидан мумкин мебошад.

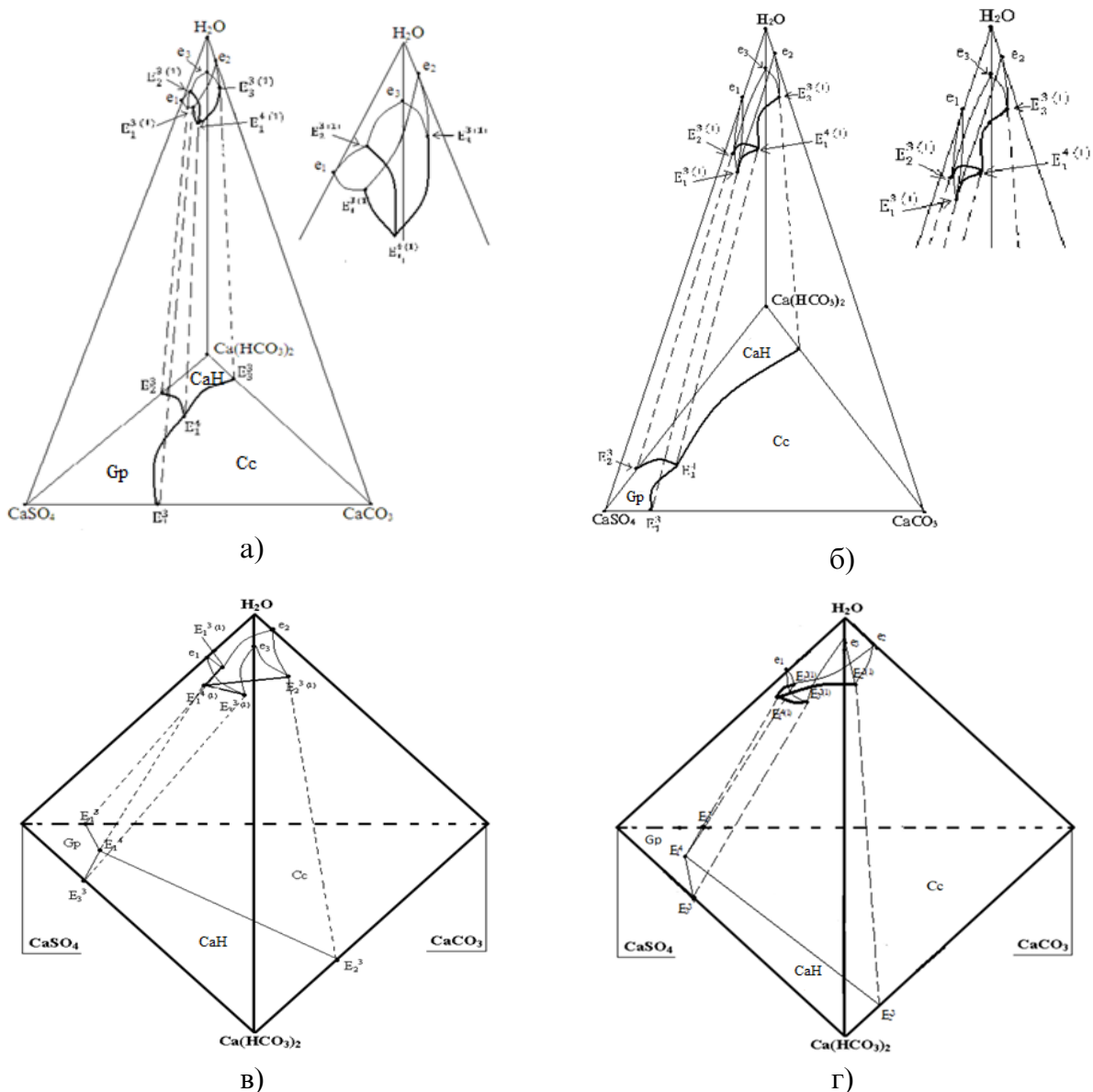
Политермаи ҳалшавандагии системаи $3\text{Ca}^{2+}-\text{SO}_4^{2-}-\text{CO}_3^{2-}-2\text{HCO}_3^--\text{H}_2\text{O}$. Қисмҳои таркибии ин системаи чоркомпонента сулфат, карбонат ва гидрокарбонати калсий мебошанд, ки дар ҳароратҳои 0, 25, 50 ва 75 °C дар шакли $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (Gr), CaCO_3 (Cc) ва $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ (CaH) кристаллизатсия мешаванд. Барои эксперимент реактивҳои зерин истифода шуданд: $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (навъи – «х.ч»); CaCO_3 (навъи – «ч»); $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ (навъи – «ч»).

Дар ҷадвали 6 маълумот оид ба ҳалшавии пайвастаҳои инфиродӣ, дар нуқтаҳои сечандаи нонвариантии система ҳам дар сатҳи таркиби секомпонента ва дар сатҳи таркиби чоркомпонента, ки аз ҷониби мо ба даст омадаанд, пешниҳод шудаанд.

Ҷадвали 6. – Политермаи ҳалшавандагӣ дар системаи $3\text{Ca}^{2+}\text{-SO}_4^{2-}\text{-CO}_3^{2-}\text{-2HCO}_3\text{-H}_2\text{O}$

№ нуқта	Таркиби фазаҳои моеъ, мас.%				Фазаҳои саҳти мувозинатӣ
	CaSO_4	CaCO_3	$\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$	H_2O	
1	2	3	4	5	6
Изотермаи 0 °C					
e ₁	0.176	-	-	99.824	Gp
e ₂	-	0.0031	-	99.996	Cc
e ₃	-	-	0.144	99.856	CaH
E ₁ ³	0.0217	0.0014	-	99.964	Gp+Cc
E ₂ ³	-	0.0014	0.083	99.90	Cc+CaH
E ₃ ³	0.0217	-	0.083	99.985	CaH+Cp
E ₁ ⁴	0.0217	0.0014	0.083	99.88	Cc+CaH+Gp
Изотермаи 25 °C					
e ₁	0.213	-	-	99.787	Gp
e ₂	-	0.0056	-	99.994	Cc
e ₃	-	-	0.0160	99.984	CaH
E ₁ ³	0.175	0.0038	-	99.821	Gp+Cc
E ₂ ³	0.186	-	0.0168	99.797	Gp+CaH
E ₃ ³	-	0.0046	0.0179	99.977	Cc+CaH
E ₁ ⁴	0.218	0.00535	0.0225	99.754	Gp+Cc+CaH
Изотермаи 50 °C					
e ₁	0.2100	-	-	99.7900	Gp
e ₂	-	0.0054	-	99.9946	Cc
e ₃	-	-	0.0145	99.9855	CaH
E ₁ ³	0.1070	0.0042	-	99.8888	Gp+Cc
E ₂ ³	-	0.0047	0.0125	99.9828	Cc+CaH
E ₃ ³	0.2580	-	0.0135	99.7285	CaH+Gp
E ₁ ⁴	0.1940	0.0063	0.0210	99.7787	Cc+CaH+Gp
Изотермаи 75 °C					
e ₁	0.3120	-	-	99.6880	Gp
e ₂	-	0.0076	-	99.9924	Cc
e ₃	-	-	0.0145	99.9855	CaG
E ₁ ³	0.1284	0.0053	-	99.8663	Gp+Cc
E ₂ ³	-	0.0059	0.0115	99.9826	Cc+CaG
E ₃ ³	0.3350	-	0.0128	99.6522	CaG+Gp
E ₁ ⁴	0.2710	0.0082	0.0207	99.7208	Cc+Gp+CaG

Дар асоси маълумоти ҷадвали 6 аз ҷониби мо диаграммаи ҳалшавии системаи чоркомпонентаи $3\text{Ca}^{2+}\text{-SO}_4^{2-}\text{-CO}_3^{2-}\text{-2HCO}_3\text{-H}_2\text{O}$ дар фосилаи ҳарорати 0 - 75 °C сохта шуд, ки дар расми 10 а) барои изотермаи 0 °C, б) барои изотермаи 25 °C, в) барои изотермаи 50 °C ва г) барои изотермаи 75 °C нишон дода шудааст.



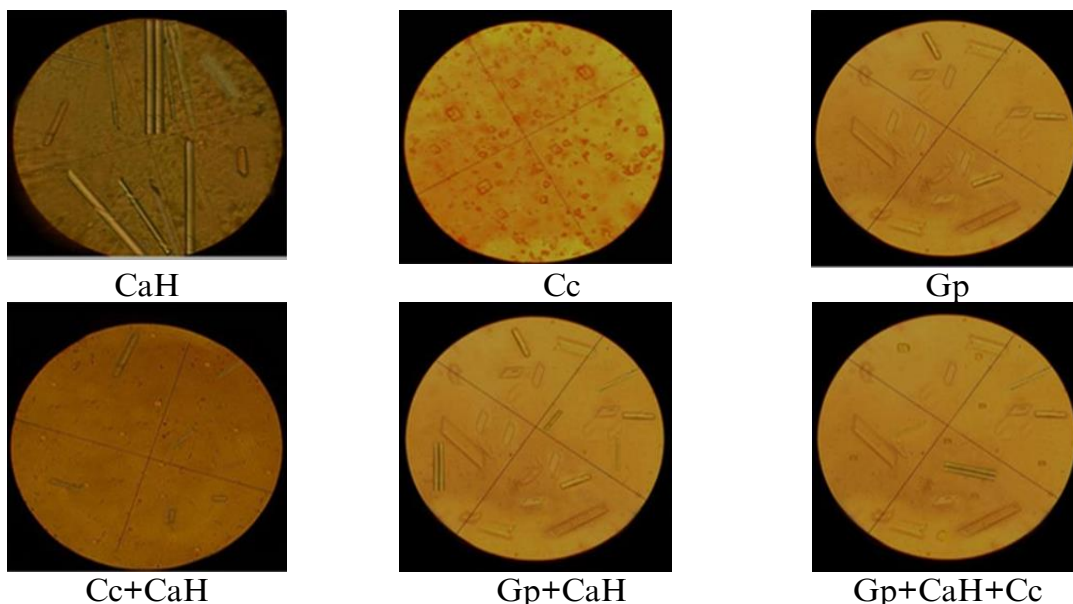
Расми 10. – Диаграммаи ҳалшавандагии $3\text{Ca}^{2+}\text{-SO}_4^{2-}\text{-CO}_3^{2-}\text{-2HCO}_3\text{-H}_2\text{O}$:
а) 0 °C; б) 25 °C; в) 50 °C; г) 75 °C

Тибқи қоидаи Фашанг паҳлуҳои секунҷа се системаи обии секомпонентаро ифода мекунад, ки онҳо: сульфати калсий-карбонати калсий; сульфати калсий-гидрокарбонати калсий ва карбонати калсий-гидрокарбонати калсий мебошанд. Системаҳои мазкур дар диаграмма чунин мавқеъ гирифтаанд: $\text{CaSO}_4\text{-CaCO}_3\text{-H}_2\text{O}$ дар қисми поён; $\text{CaSO}_4\text{-Ca(HCO}_3)_2\text{-H}_2\text{O}$ дар қисми чапи диаграмма ва $\text{CaCO}_3\text{-Ca(HCO}_3)_2\text{-H}_2\text{O}$ дар қисми рост аз поён ба болои диаграмма.

Ҳар як компоненти алоҳида бо ҳалқунанда ба остои координатӣ бо хатти моновариантии консентратсионӣ ифода гардидааст. Координатаҳои дигари шакли геометрӣ мувофиқи маълумоти ҳалшавандагӣ бо истифода аз усули массентрӣ муайян карда шудааст. Тавре ки аз расми 10 бармеояд, дар системаи чоркомпонентаи таҳқиқшаванда майдони кристаллизатсияи Сс (CaCO_3) қисми назарраси онро ишғол мекунад, ки ин бо ҳалшавии ками ин намак дар шароитҳои овардашуда тавсиф меёбад.

Тавре ки дар боло қайд гардид ҳолати расидани мувозинатии системаи таҳқиқшаванда бо усули кристаллооптикӣ назорат карда шуд, яъне тавассути мушоҳидаи фазаҳои саҳти таҳшин бо ёрии микроскоп ва аксбардории онҳо.

Дар расми 11 микроаксҳои фазаҳои саҳти мувозинатии инфиродӣ ва омехтаи онҳо дар хатҳои моновариантии системаи омӯхташаванда ва нуқтаҳои сечечандаи таркиби пурраи система пешниҳод шудаанд.



Расми 11. – Политермаи микроаксҳои фазаҳои саҳти мувозинатии системаи $3\text{Ca}^{2+}\text{-SO}_4^{2-}\text{-CO}_3^{2-}\text{-2HCO}_3^-\text{-H}_2\text{O}$

Политермаи ҳалшавӣ дар системаи Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, $\text{CO}_3^{2-}\text{-H}_2\text{O}$. Фазаҳои саҳти мувозинатии системаи таҳқиқшаванда дар фосилаи ҳароратҳои $0\div 100^\circ\text{C}$ инҳоянд: $\text{Na}_2\text{SO}_4\cdot 10\text{H}_2\text{O}$ - мирабилит (Mb); $\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ - гипс (Gp); CaCO_3 - калсит (Cc); $\text{Na}_2\text{CO}_3\cdot \text{CaCO}_3\cdot 5\text{H}_2\text{O}$ - гейлюссит (Gl); $\text{Na}_2\text{SO}_4\cdot \text{CaSO}_4$ - глауберит (Gb); Na_2SO_4 - тенардит (Te); $\text{Na}_2\text{CO}_3\cdot \text{CaCO}_3\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ - пирсонит (Pr); $\text{Na}_2\text{CO}_3\cdot \text{H}_2\text{O}$ - термонатрит (Na1); $5\text{CaSO}_4\cdot \text{Na}_2\text{CO}_3\cdot 3\text{H}_2\text{O}$ - $5\text{C}\cdot \text{Na}\cdot 3$.

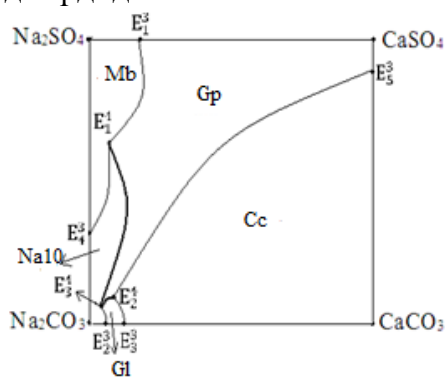
Дар ҷадвали 7 маълумот оид ба ҳалшавии пайвастагиҳои инфиродӣ, дар баъзе нуқтаҳои сечандаи нонвариантии таркиби секомпонента ва сатҳи таркиби чоркомпонента, ки аз ҷониби мо ба даст омадаанд, пешниҳод шудаанд.

Ҷадвали 7. – Политермаи ҳалшавандагии системаи Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, $\text{CO}_3^{2-}\text{-H}_2\text{O}$

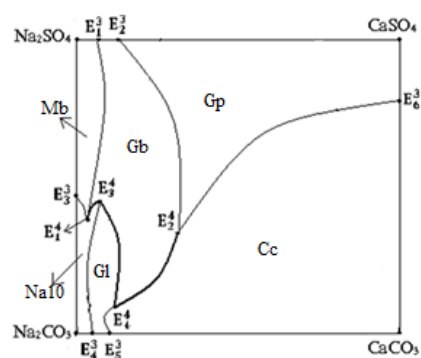
№ нуқта	Таркиби фазаи моеъ, мас.%					Фазаи саҳти мувозинатӣ
	Na_2SO_4	CaSO_4	Na_2CO_3	CaCO_3	H_2O	
1	2	3	4	5	6	7
Изотермаи 0°C						
E_1^3	4.340	0.196	-	-	95.460	Mb+Gp
E_2^3	-	-	12.00	0.0048	87.990	Na10+Gl
E_3^3	-	-	4.300	0.0048	95.690	Gl+Cc
E_4^3	2.800	-	6.010	-	91.190	Mb+Na10
E_5^3	-	0.200	-	0.0045	99.795	Gp+Cc
E_1^4	1.967	0.244	1.551	-	96.238	Mb+Na10+Gp
E_2^4	-	0.272	11.300	0.00465	88.420	Na10+Gp+Gl
E_3^4	-	0.340	18.300	0.0125	81.347	Gp+Gl+Cc
Изотермаи 25°C						
E_1^3	21.750	0.197	-	-	78.050	Mb+Gb
E_2^3	25.780	0.188	-	-	74.032	Gp+Gb
E_3^3	16.400	-	18.400	-	65.300	Mb+Na10
E_4^3	-	-	5.6500	0.0035	94.3465	Na10+Gl
E_5^3	-	-	4.5000	0.0024	95.4976	Gl+Cc
E_6^3	-	0.2130	-	0.0048	99.7822	Gp+Cc
E_1^4	14.200	0.273	19.600	-	65.927	Mb+Na10+Gb
E_2^4	-	0.408	18.550	0.0055	81.0365	Gp+Gb+Cc

Хотимаи ҷадвали 7						
1	2	3	4	5	6	7
E_3^4	12.5200	-	19.4500	0.0052	68.0248	Na10+Gl+Gb
E_4^4	-	0.3280	20.7000	0.0043	78.9677	Cc+Gb+Gl
Изотермаи 50 °C						
E_1^3	22.470	—	10.520	—	67.010	Te+Br
E_2^3	5.870	—	28.520	—	65.610	Br+Na1
E_3^3	—	0.1070	—	0.0042	99.8888	Gp+Cc
E_4^3	3.300	0.166	—	—	96.534	Te+Gb
E_5^3	3.880	0.274	—	—	95.846	Gb+Gp
E_6^3	—	—	24.7800	0.0039	75.2161	Na1+Pr
E_7^3	—	—	20.9300	0.0041	79.0659	Pr+Cc
E_1^4	1.521	0.148	3.743	—	94.588	Te+Br+Gb
E_2^4	3.7190	—	13.980	0.00375	82.2970	Na1+Br+Pr
E_3^4	8.9230	0.1620	—	0.0047	90.9100	Gp+Cc+Gb
E_4^4	—	0.1360	2.7700	0.0046	97.0894	Cc+Pr+Gb
E_5^4	6.1700	—	9.0100	0.0063	84.8137	Gb+Br+Pr
Изотермаи 75 °C						
E_1^3	25.00	—	6.40	—	68.6000	Te+Br
E_2^3	3.800	—	28.900	—	67.3000	Br+Na1
E_3^3	4.600	0.522	—	—	94.8780	Te+Gb
E_4^3	5.840	0.888	—	—	93.2720	Gb+5CaNa3
E_5^3	4.340	0.884	—	—	95.3760	5CaNa3+Gp
E_6^3	—	—	21.750	0.0065	78.2435	Na1+Pr
E_7^3	—	—	24.800	0.0078	75.1922	Pr+Cc
E_8^3	—	0.692	—	0.0063	81.7837	Gp+Cc
E_1^4	24.380	0.911	20.290	—	54.4190	Te+Gb+Br
E_2^4	28.420	—	30.140	0.0058	41.4342	Na1+Br+Pr
E_3^4	15.190	0.824	—	0.0067	83.9793	5CaNa3+Gp+Cc
E_4^4	16.980	0.783	21.180	—	61.0570	Gb+Br+5CaNa3
E_5^4	—	0.544	33.720	0.0091	65.7200	5CaNa3+Cc+Pr
E_6^4	—	0.646	21.160	0.0053	78.1887	Br+Pr+5CaNa3

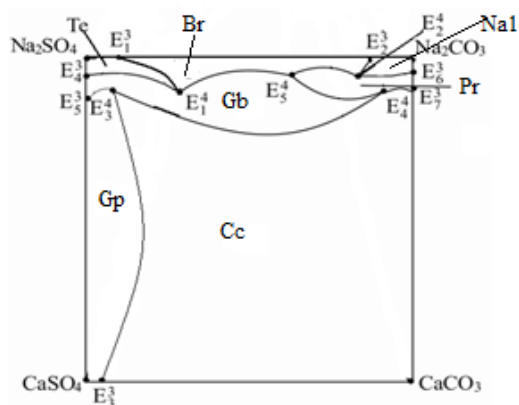
Дар асоси маълумоти дар ҷадвали 7 овардашуда аз ҷониби мо диаграммаҳои изотермии ҳалшавии системаи чоркомпонентаи Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, CO_3^{2-} - H_2O сохта шуд. Қисми беобии диаграммаи сохташуда дар шакли чоркунҷаи баробартараф дар расми 12 пешниҳод гардидааст.



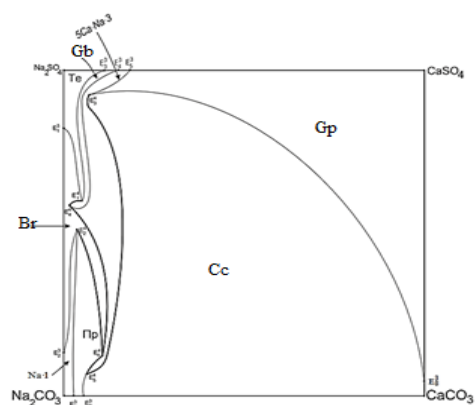
а)



б)



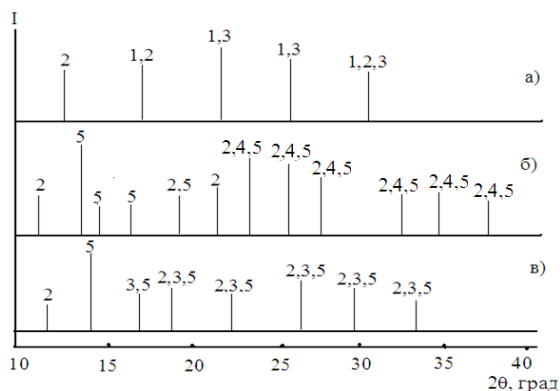
в)



г)

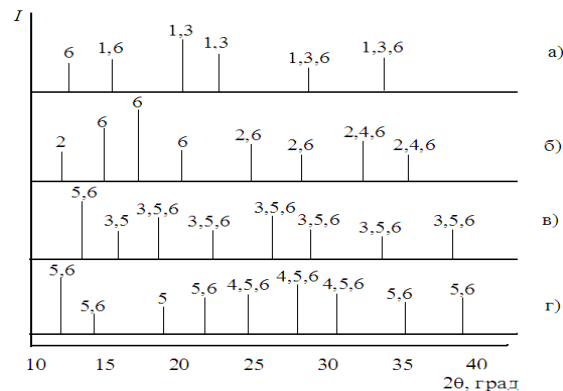
Расми 12. – Проексияи беоби (намакӣ)-и диаграммаи ҳолатии системаи Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, $\text{CO}_3^{2-} - \text{H}_2\text{O}$, дар шароити изотермии а) 0 °C; 25 °C; 50 °C; 75 °C

Расми 13 штрихренгенограммаҳои фазаҳои саҳти мувозинатӣ дар изотермаҳои эксперименталии системаи Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, $\text{CO}_3^{2-} - \text{H}_2\text{O}$ барои 1. дар 0, 2. дар 25 ва 3. дар 50 °C нишон дода шудаанд. Таҳлили рентгенофазагӣ низ ифода менамояд, ки дар қуллаҳои ифодакунандаи нуқтаҳои нонвариантии сатҳи чорчанда се фазаи саҳт дар ҳолати мувозинатӣ қарор доранд.



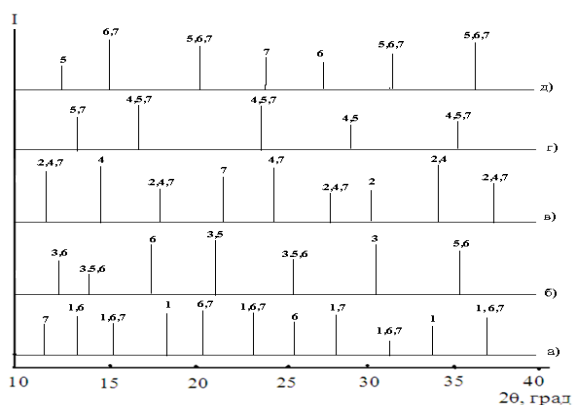
1)

а) $\text{Mb} + \text{Gp} + \text{NaI}$ (нуқтаи E_1^4); б) $\text{Gp} + \text{Gl} + \text{Cc}$ (нуқтаи E_2^4); в) $\text{Gp} + \text{NaI} + \text{Gl}$ (нуқтаи E_3^4);
1 – Mb, 2 – Gp, 3 – NaI, 4 – Cc, 5 – Gl



2)

а) $\text{Mb} + \text{Gb} + \text{NaI}$ (нуқтаи E_1^4); б) $\text{Gp} + \text{Gb} + \text{Cc}$ (нуқтаи E_2^4); в) $\text{NaI} + \text{Gb} + \text{Gl}$ (нуқтаи E_3^4); г) $\text{Cc} + \text{Gb} + \text{Gl}$ (нуқтаи E_4^4); 1 – Mb, 2 – Gp, 3 – NaI, 4 – Cc, 5 – Gl, 6 – Gb



3)

а) $\text{Te} + \text{Br} + \text{Gb}$ (нуқтаи E_1^4); б) $\text{Br} + \text{NaI} + \text{Pr}$ (нуқтаи E_2^4); в) $\text{Gb} + \text{Gp} + \text{Cc}$ (нуқтаи E_3^4); г) $\text{Pr} + \text{Cc} + \text{Gb}$ (нуқтаи E_4^4); д) $\text{Pr} + \text{Br} + \text{Gb}$ (нуқтаи E_5^4). 1 – Te, 2 – Gp, 3 – NaI, 4 – Cc, 5 – Pr, 6 – Br, 7 – Gb

Расми 13. – Штрих рентгенограммаи фазаҳои саҳти мувозинатии системаи Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, $\text{CO}_3^{2-} - \text{H}_2\text{O}$ дар 0 °C: 1. дар 0 °C, 2. дар 25 °C ва 3. дар 50 °C

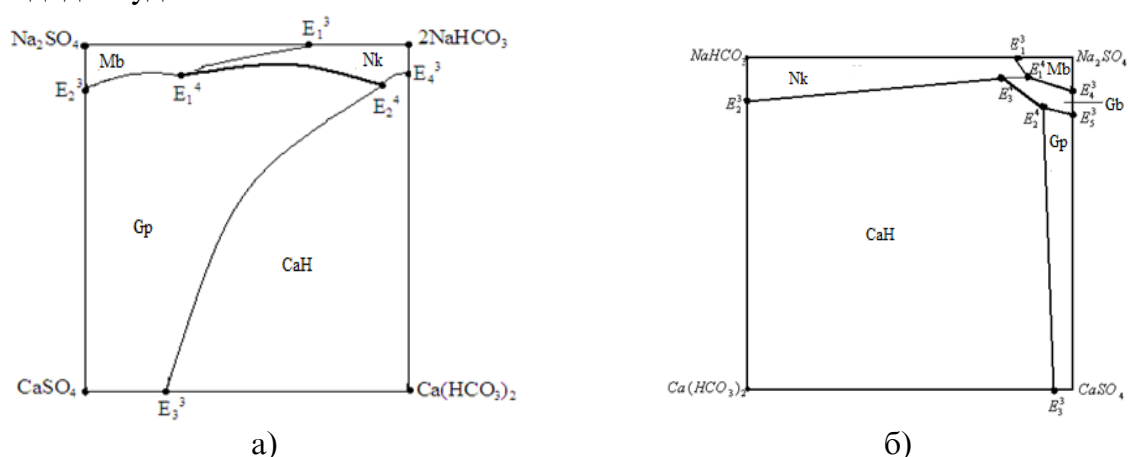
Ҳалшавии системаи Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, $\text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$. Барои ҳароратҳои 0 ва 25 °C дар системаи таҳқиқшаванда $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ – гидрокарбонати калсий (CaH), NaHCO_3 – нахколит (Nk), $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ – мирабилит (Mb), $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ – гипс (Gp) ва $\text{CaSO}_4 \cdot \text{Na}_2\text{SO}_4$ – глауберит (Gb) ҳамчун фазаҳои мувозинатӣ таҳшин мешаванд. Баҳри гузаронидани таҷрибаҳо реактивҳои зерин истифода шуданд: $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ (навъи-«х.ч.»), NaHCO_3 (навъи-«ч.»), $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ (навъи-«ч.»), $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (навъи-«х.ч.»).

Дар чадвали 8 маълумот оид ба ҳалшавии пайвастаҳои инфиродӣ, дар нуқтаҳои нонвариантии системаи таҳқиқшаванда дар сатҳи таркиби секомпонента ва чоркомпонента аз ҷониби мо натиҷагирӣ шуда, пешниҳод шудаанд.

Чадвали 8. – Маълумот оиди ҳалшавандагии системаи Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, HCO_3^- - H_2O

№ нуқта	Таркиби фазаҳои моеъ, мас. %					Таркиби фазавии таҳшинҳо
	Na ₂ SO ₄	NaHCO ₃	CaSO ₄	Ca(HCO ₃) ₂	H ₂ O	
Ҳарорати 0 °C						
E ₁ ³	2.570	5.820	–	–	91.610	Mb+Nk
E ₂ ³	4.340	–	0.196	–	95.464	Mb+Gp
E ₃ ³	–	–	0.217	0.083	99.700	Gp+CaH
E ₁ ⁴	3.430	5.220	0.326	–	91.024	Mb+Gp+Nk
E ₂ ⁴	–	4.865	0.131	0.153	94.851	Gp+Nk+CaH
Ҳарорати 25 °C						
E ₁ ³	20.680	4.160	-	-	75,160	Nk+Mb
E ₂ ³	-	4.890	-	0.0109	95.090	Nk+CaH
E ₃ ³	-	-	0.1860	0.0168	99.7970	CaH+Gp
E ₄ ³	21.750	-	0.197	-	78.050	Mb+Gp
E ₅ ³	25.780	-	0.188	-	74.030	Gb+Gp
E ₁ ⁴	28.380	5.200	0.270	-	66.150	Nk+Mb+Gb
E ₂ ⁴	25.140	-	0.184	0.0136	74.660	Gb+Gp+CaH
E ₃ ⁴	24.400	7.120	-	0.0163	68.460	Nk+CaH+Gb

Мувозинати моновариантии ҳатҳо ифода менамояд, ки ҳалшавандагии намакҳои сулфати натрий ва гидрокарбонати натрий дар онҳо нисбатан кам гардидааст. Чунин ҳолат ба илова гардидани фазаҳои минбаъда алоқаманди дошта, бинобар сабаби камҳалшаванда буданашон ба ҳалшавандагии намакҳои хубҳалшаванда бетаъсир намеремонанд. Дар асоси маълумоти чадвали 8 диаграммаи ҳалшавии системаи чоркомпонентаи Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, HCO_3^- - H_2O дар 0 ва 25 °C сохта шуд, ки дар расми 14 нишон дода шудааст.



Расми 14. – Проексияи беоби (намакӣ)-и диаграммаи ҳалшавандагии системаи Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, HCO_3^- - H_2O , дар шароити изотермии а) дар 0 °C ва б) дар 25 °C

Таҳқиқи ҳалшавандагӣ дар системаи муовизаи Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{CO}_3^{2-}$, HCO_3^- - H_2O . Дар шароити додашуда фазаҳои саҳти мувозинатии системаи таҳқиқшаванда CaCO_3 – калсит (Cc); $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ – декагидрати карбонати натрий (Na10); $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{CaCO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ – гейлюссит (Gl); NaHCO_3 – нахколит (Nk); $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ – калсий гидрокарбонат (CaH) ва $\text{CaSO}_4 \cdot \text{Na}_2\text{SO}_4$ – глауберит (Gb) буда метавонанд.

Дар чадвали 9 маълумот оид ба ҳалшавии пайвастагиҳои инфиродӣ, дар нуқтаҳои нонвариантии системаи таҳқиқшаванда дар сатҳи таркиби се-чоркомпонента пешниҳод шудаанд.

Чадвали 9. – Маълумот оиди ҳалшавандагии системаи Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{CO}_3^{2-}$, HCO_3^- - H_2O

№ нуқта	Таркиби фазаҳои моеъ, мас.%					Фазаҳои сахти мувозинатӣ
	Na ₂ CO ₃	NaHCO ₃	CaCO ₃	Ca(HCO ₃) ₂	H ₂ O	
Изотермаи 0 °C						
e ₁	6.5700	-	-	-	93.4300	Na10
e ₂	-	6.4900	-	-	93.5100	Nk
e ₃	-	-	0.0031	-	99.9969	Cc
e ₄	-	-	-	0.1440	99.8560	CaH
E ₁ ³	5.600	4.610	-	-	89.790	Na10+Nk
E ₂ ³	12.00	-	0.0048	-	87.9952	Na10+Gl
E ₃ ³	4.300	-	0.0046	-	95.6954	Gl+Cc
E ₄ ³	-	4.890	-	0.109	95.001	Nk+CaH
E ₅ ³	-	-	0.0014	0.0830	99.9156	Cc+CaH
E ₁ ⁴	6.1670	2.4430	0.0065	-	91.3835	Na10+Nk+Gl
E ₂ ⁴	5.9040	-	0.0057	0.3080	93.7823	Cc+Gl+CaH
E ₃ ⁴	5.5100	5.8960	-	0.1900	88.4040	Nk+CaH+Gl
Изотермаи 25 °C						
e ₁	22.9500	-	-	-	77.0500	Na10
e ₂	-	-	0.0048	-	99.9952	Cc
e ₃	-	9.3900	-	-	90.6100	Nk
e ₄				0.0160	99.9840	CaH
E ₁ ³	22.4600	2.8400	-	-	74.7000	Na10+Tr
E ₂ ³	17.6200	4.6200	-	-	77.7600	Tr+Nk
E ₃ ³	5.6500	-	0.0035	-	94.3465	Na10+Gl
E ₄ ³	4.5000	-	0.0024	-	95.4976	Gl+Cc
E ₅ ³	-	5.4300	-	0.0181	94.5519	Nk+CaH
E ₆ ³	-	-	0.0046	0.0179	99.9775	Cc+CaH
E ₁ ⁴	7.8500	3.7200	0.00336	-	88.4266	Na10+Tr+Gl
E ₂ ⁴	9.8300	4.6820	-	0.0229	85.4651	Tr+Nk+CaH
E ₃ ⁴	-	4.4150	0.00423	0.0215	95.5592	Cc+CaH+Gl
E ₄ ⁴	8.6740	3.9180	-	0.0198	87.3882	Tr+Gl+CaH

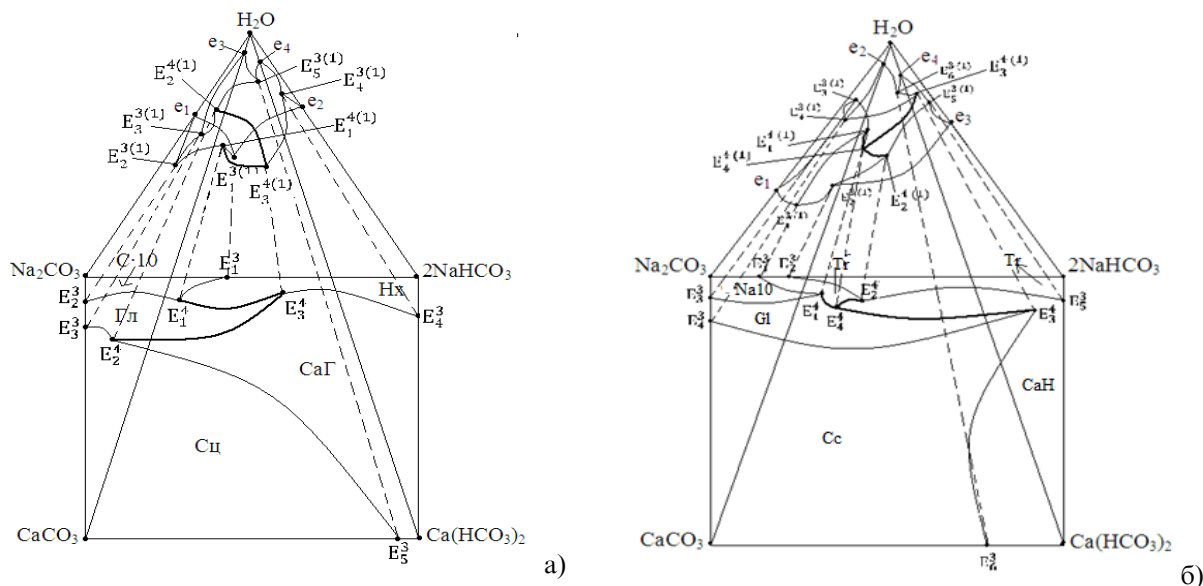
Чи хеле, ки натиҷаҳои ҳалшавандагии системаи Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{CO}_3^{2-}$, HCO_3^- - H_2O чадвали 9 ифода мекунад, баландшавии ҳарорат дар баробари тағйирот ворид намудан ба ҳалшавандагии моддаҳо дар шакли геометрӣ, инчунин ба тағйироти фазагӣ дар системаи мазкур меоварад. Ин боиси мураккаб гардидани сохтори диаграмма нисбат бар диаграммаи системаи мазкур дар 0 °C мегардад. Агар ҳалшавандагии қисмҳои таркибии системаи музкурро муқоиса намоем таъсири ҳароратро дар он мебинем. Мисол: бо баланшавии ҳарорат ҳалшавандагии карбонати натрий - аз 6.57 ба 22.95 % дар маҳлул; гидрокарбонати натрий - аз 6.49 ба 9.39 %; карбонати калсий - аз 0.0031 ба 0.0048 % ва гидрокарбонати калсий бошад - аз 0.144 ба 0.0160 тағйир меёбад. Инчунин баланшавии ҳарорат боис мегардад, ки байни фазаҳои декагидрати карбонати натрий ва нахколит таъсири муттақобила ба амал омада фазаи нави трона, ки кристаллогидрати намаки омехта мебошад, ҳосил шавад.

Дар изотермаи 0 °C консентратсияи моддаҳо барои қачхатҳои моноварианти чунин мебошанд: 5.6% - Na_2CO_3 ва 4.61% - NaHCO_3 бо фазаҳои мувозинатии сахти Na10

+ Nk; 12.0% - Na_2CO_3 ва 0.0048% CaCO_3 бо фаҳои мувозинатии саҳти Na10+Gl ; 4.3% - Na_2CO_3 ва 0.0046% - CaCO_3 бо фаҳои мувозинатии саҳти Gl+Cc ; 4.89% - NaHCO_3 ва 0.109% - $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ бо фаҳои мувозинатии саҳти Nk+CaH ва 0.0014% - CaCO_3 ва 0.083% - $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ бо фаҳои мувозинатии саҳти Cc+CaH .

Барои изотермаи 25 °C консентратсияи моддаҳо дар фазаи моеъ чунин мебошад: 22.46% - Na_2CO_3 ва 2.84% - NaHCO_3 бо фаҳои мувозинатии саҳти Na10+Tr ; 17.62% - Na_2CO_3 ва 4.62 - NaHCO_3 бо фаҳои мувозинатии саҳти Tr+Nk ; 5.65% - Na_2CO_3 0.0035% - CaCO_3 бо фаҳои мувозинатии саҳти Na10+Gl ; 4,5% - Na_2CO_3 ва 0.0024% - CaCO_3 бо фаҳои мувозинатии саҳти Gl+Cc ; 5.43% - NaHCO_3 ва 0.0181% $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ бо фаҳои мувозинатии саҳти Nk+CaH ; 0.0046% - CaCO_3 ва 0.0179% - $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ бо фаҳои мувозинатии саҳти Cc+CaH . Таъсири ҳарорат на ин ки ба ҳалшавандагӣ, балки ба ҳосилшавии фазаи нави мувозинатӣ меоварад. Дар ин система тағйирот дар ҳосилшавии фаҳои саҳти мувозинатии нуқтаҳо ва консентратсияи қисмҳои таркибии онҳо ба назар мерасанд.

Дар асоси маълумоти ҷадвали 9 аз ҷониби мо диаграммаи ҳалшавии системаи чоркомпонентаи Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{CO}_3^{2-}$, HCO_3^- - H_2O дар 0 ва 25 °C сохта шуд, ки қисми он намоиши он дар расми 15 пешниҳод гардидааст.



Расми 15. – Диаграммаи ҳалшавандагии системаи Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{CO}_3^{2-}$, HCO_3^- - H_2O :
а) дар 0 °C ва б) дар 25 °C

Параметрҳои консентратсионии фаҳои саҳти мувозинатӣ дар системаи Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, CO_3^{2-} , HCO_3^- - H_2O асоси коркарди партовҳои моеъи истеҳсоли алюминий, ҳамчун асоси фундаменталӣ

Системаи бисёркомпонентаи Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, CO_3^{2-} , HCO_3^- - H_2O ва мувозинати нонвариантии он. Мувофиқи назарияи таҳлили физико-химиявӣ, новобаста аз вариантҳои ташаккули нуқтаи нонвариантии, консентратсияи мувозинатии фазаи моеъ барои он бояд доимӣ бошад. Аммо, мувофиқи маълумотҳои қаблӣ дар бисёр ҳолатҳо барои як ва якхела таркиби фазавии таҳшинҳои нуқтаҳои нонвариантии маҳлулҳои сершудаи мувозинатӣ бо миқдори гуногуни қисмҳои таркибӣ (компонентҳо) муайян карда шудаанд. Масалан, дар системаи панҷкомпонентаи Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, CO_3^{2-} , HCO_3^- - H_2O дар 0 °C барои яке аз нуқтаҳои нонвариантии ду таркиби гуногуни фазаи моеъи мувозинатӣ муайян шудааст (ҷадвали 10).

Ҷадвали 10. – Ҳалшавандагии системаи Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, CO_3^{2-} , HCO_3^- - H_2O дар 0 °C

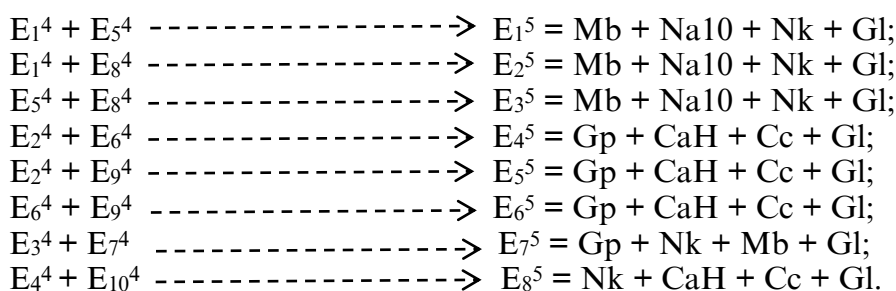
Намуна	Таркиби маҳлули сер, мас. %							Таркиби фазаи саҳт
	Na_2SO_4	NaHCO_3	CaSO_4	Na_2CO_3	CaCO_3	$\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$	H_2O	
ТПМ	5.2800	4.5100	-	5.7800	0.0054	-	84.4246	Nk+Mb+Na10+Gl
Эксп.	5.3700	4.6900	-	5.7600	0.0061	-	84,1739	Nk+Mb+Na10+Gl

Тавре ки аз ҷадвали 10 дида мешавад, барои як ва якхела таркиби фазаҳои саҳти мувозинатӣ фазаи моеъи мувозинатӣ бо миқдори гуногуни намакҳои дахлдор хос аст. Аз ин рӯ, метавон хулоса кард, ки чор фазаи саҳти мувозинатии зикршуда, ки ба ин нуқтаи нонварианти мувофиқат мекунанд, метавонанд якҷоя на дар консентратсияи муайян (доимӣ)-и фазаи моеъи мувозинатӣ барои онҳо, балки дар як интервали муайяни консентратсияи намакҳои дар он мавҷудбуда кристаллизатсия шаванд.

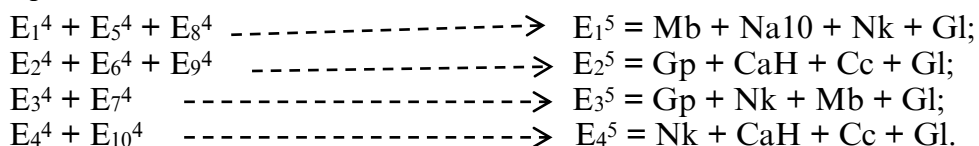
Таҷрибаи татбиқи усули транслятсия барои пешгӯӣ ва сохтани диаграммаҳои мувозинатҳои фазавии системаҳои бисёркомпонента (панҷ ва шашкомпонента) ба вариантҳои гуногуни ташаккули шаклҳои геометрии онҳо ишора мекунанд. Бо истифода аз усули ҳалшавандагӣ барои системаи панҷкомпонентаи Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, CO_3^{2-} , HCO_3^- - H_2O дар 0°C 4 нуқтаи нонварианти бо фазаҳои саҳти мувозинатӣ муайян карда шуданд: $E_1^5 = \text{Mb} + \text{Na10} + \text{Nk} + \text{Gl}$; $E_2^5 = \text{Gp} + \text{CaH} + \text{Cc} + \text{Gl}$; $E_3^5 = \text{Gp} + \text{Nk} + \text{Mb} + \text{Gl}$; $E_4^5 = \text{Nk} + \text{CaH} + \text{Cc} + \text{Gl}$. Барои нуқтаи нонвариантии 1 аз рӯи таҷриба ду таркиби маҳлули сершуда пайдо шудааст, дар ҳоле ки барои ду нуқтаи дигар яқтогӣ таркиб муайян гардидааст.

Маълумоте, ки бо усули транслятсия ба даст омадаанд, мавҷудияти чаҳор нуқтаи нонвариантиро барои ин система тасдиқ мекунанд ва ҳамзамон мавҷудияти таркиби гуногуни маҳлули сершударо барои як ва якхела нуқтаи нонварианти шарҳ медиҳанд. Ин далелро бо таҳлили роҳҳои ташаккули нуқтаҳои нонвариантии системаи Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, CO_3^{2-} , HCO_3^- - H_2O дар 0°C метавон тасдиқ кард.

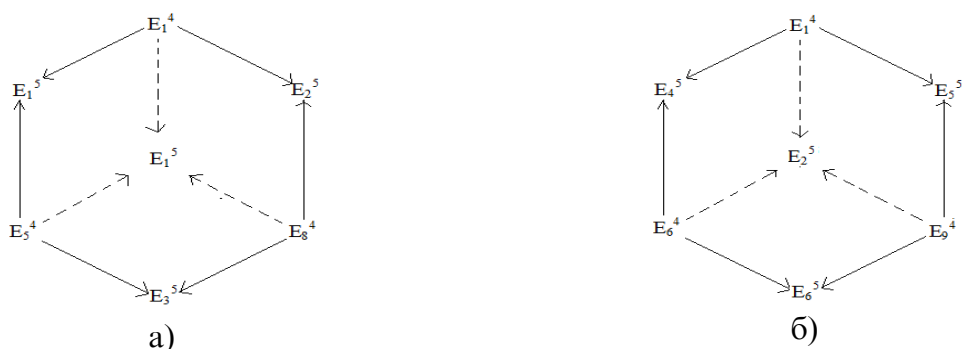
Транслятсияи нуқтаҳои нонвариантии чоркомпонента ба сатҳи таркиби панҷкомпонента дар шакли хатҳои моноварианти ва буриши мутақобилаи онҳо, бо риояи қоидаи фазаҳои Гиббс, бо пайдоиши нуқтаҳои нонвариантии панҷгонаи зерин сабаб мешавад:



Тавре ки мебинем, аз 8 нуқтаи нонвариантии панҷгонаи бавучудомада, E_1^5 , E_2^5 , E_3^5 ва инчунин E_4^5 , E_5^5 , E_6^5 бо фазаҳои саҳти мувозинатии якхела хосанд. Ин маънои онро дорад, ки онҳо дар натиҷаи буриши сетарафаи хатҳои моноварианти, ки ҳангоми транслятсияи нуқтаҳои нонвариантии чоргона ба вуҷуд омадаанд, ташаккул меёбанд. Аз ин рӯ, барои системаи панҷкомпонентаи Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, CO_3^{2-} , HCO_3^- - H_2O дар 0°C на ҳашт, балки 4 нуқтаи нонвариантии панҷгона хос аст, ки ба таври зайл ташаккул ёфтаанд:



Бо назардошти гуфтаҳои боло, метавон пешгӯӣ кард, ки таркиби гуногуни маҳлули сершудаи нуқтаи нонвариантии системаи бисёркомпонента бо як ва якхела таркиби фазаҳои саҳти мувозинатӣ (ҷадвали 10) ба роҳҳои гуногуни расидан ба мувозинат алоқаманд аст. Аз ин рӯ, ташаккули нуқтаҳои нонвариантии панҷгонаи E_1^5 ва E_2^5 системаи Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, CO_3^{2-} , HCO_3^- - H_2O дар 0°C -ро ба таври графикӣ чунин ифода кардан мумкин аст (расми 16).



Расми 16. – Тарҳи вариантҳои ҳосилшавии нуқтаҳои нонвариантии системаи $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}, \text{CO}_3^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$ дар 0°C зимни тарнслятсияи нуқтаҳои чорчанда ба сатҳи таркиби панҷкомпонентагӣ бо таҳшинҳои: а) $\text{Mb}+\text{Na}10+\text{Nk}+\text{Gl}$; б) $\text{Gr}+\text{CaH}+\text{Cc}+\text{Gl}$

Дар расми 16 қачхатҳои кашидашуда бо тирчаҳо буриши дутарафaro ва хатҳои пунктирӣ бо тирчаҳо буриши сетарафаи қачхатҳои моновариантиро ҳангоми ташаккули нуқтаҳои нонвариантии E_1^5 ва E_2^5 нишон медиҳанд. Аз гуфтаҳои боло метавон пешгӯӣ кард, ки мо бо ҳолате сарукор дорем, ки дар диаграммаи системаҳои бисёркомпонента мувозинатҳои нонварианти на танҳо дар шакли нуқтаҳои беандоза, балки инчунин дар шакли ифодаҳои геометрии (нонвариантии) дорои андозаи муайян инъикос ёфта метавонанд. Андозаи ин шаклҳо бо таркибҳои гуногуни фазаи моеъи мувозинатӣ, ки барои як ва яхела таркиби фазаҳои саҳти мувозинатӣ ҳосанд, муайян карда мешавад.

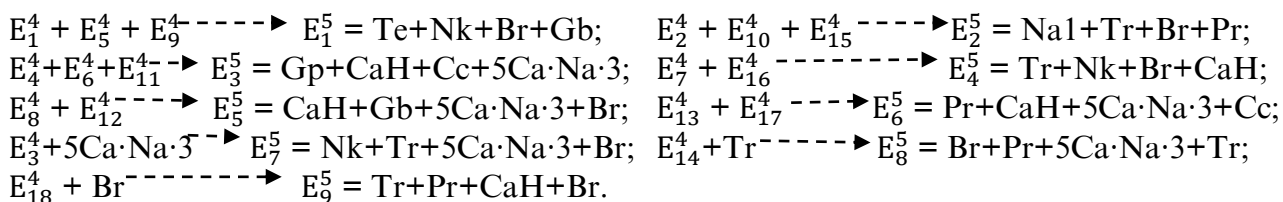
Тағйирёбии таркиби фазаи моеъи мувозинатӣ метавонад ба роҳҳои гуногуни (вариантҳои) ташаккули ин шакли геометрии нуқтаи нонварианти алоқаманд бошад. Чунин фарзия на танҳо бо мисоли баррасишудаи ҳалшавандагии системаи панҷкомпонентаи $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}, \text{CO}_3^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$ дар 0°C , балки бо таҳқиқи дигар системаҳои бисёркомпонента низ тасдиқ меёбад. Таркиби гуногуни химиявии маҳлули сершуда дар системаи $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}, \text{CO}_3^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$ дар 0°C чадвали 10 барои як ва яхела таркиби фазаҳои саҳти нуқтаҳои нонвариантиро, бешубҳа, бо тартиби пайдарпайи илова кардани намакҳои муайян ба омехтаи ибтидоӣ шарҳ додан мумкин аст, ки ин бо вариантҳои гуногуни тарнслятсияи нуқтаҳои нонвариантии чоргона ба сатҳи таркиби панҷкомпонента мувофиқат мекунад.

Имконияти принципалии мувофиқати як ва яхела таркиби фазаҳои саҳти нуқтаҳои нонварианти ба фазаҳои моеъи мувозинатӣ, ки аз рӯи таркиби химиявӣ гуногунанд, дар ҳолати бисёркомпонента будани системаи таҳқиқшаванда нишон дода шуд. Ин метавонад бо гуногунии роҳҳои расидан ба мувозинати нонварианти асоснок карда шавад. Аз ин рӯ, мувозинати нонварианти дар диаграммаи системаи бисёркомпонентаи $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}, \text{CO}_3^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$ метавонад на танҳо дар шакли нуқта (вақте ки як варианти ташаккули он вучуд дорад), инчунин дар шакли ифодаи геометрии нуқта, инчунин онро шартан метавон квазинуқта номид, ки андозаи муайян дорад (вақте ки мувозинат метавонад бо зиёда аз як вариант амалӣ шавад), инъикос ёбад.

Мувозинати моноварианти дар системаи бисёркомпонентаи $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}, \text{CO}_3^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$. Донишмандони қонуниятҳои мувозинатҳои фазаӣ ва сохтори комплексҳои фазавии системаҳои бисёркомпонента на танҳо аз ҷиҳати илмӣ, балки барои фароҳам овардани шароити беҳтарин ҷиҳати барои коркарди ашёи хоми табиӣ полиминералӣ ва мураккаби техникӣ (партовҳои истеҳсоли) ниҳоят зарур аст. Муайян кардани ин қонуниятҳо дар таҷриба бо мушкилоти зиёде болои ҳам мебошад, ки муҳимтарини онҳо инҳоянд: набудани шаклҳои геометрии бисёрченакаи воқеӣ барои нишон додани қонуниятҳои ошкоршуда; набудани усулҳои боэътимоди муайянкунии фазаҳои саҳти мувозинатӣ аз сабаби гуногунии онҳо; хароҷоти зиёди моддӣ ва вақт ҳангоми гузаронидани таҷрибаҳо. Барои ҳалли ин мушкилот як қатор усулҳо таҳия шудаанд, аммо истифодаи онҳо маҳдуд аст. Аз ҷумла, таҳқиқи системаи бисёркомпонента бо усули кам кардани энергияи Гиббс ба ақидаи ҳуди муаллифон,

барои системаҳое, ки на бештар аз чор компонент доранд, натиҷаҳои каноатбахш медиҳад. Ҳангоми афзоиши компонентнокии система ба 5 ва зиёда аз он, дақиқии ҳисобҳо коҳиш меёбад. Илова бар ин, дар асоси натиҷаҳои бо ин усул бадастомада, диаграммаи комплекси фазавии пӯшидаи системаи таҳқиқшударо сохтан ғайриимкон аст.

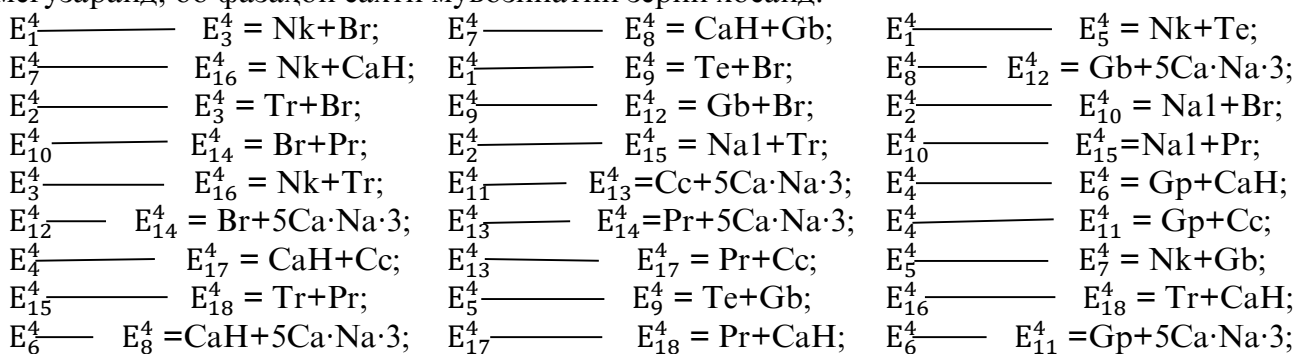
Таҷрибаи тадбиқи усули транслятсия барои таҳқиқи қисмҳои системаи панҷкомпонентаи Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, CO_3^{2-} , HCO_3^- - H_2O ба хусусияти гуногуни ташаккули шаклҳои геометрӣ, бахусус хатҳои моновариантии системаҳои таҳқиқшуда ишора мекунад. Дар зер ифодаи математикии вариантҳои гуногуни бурида шудани хатҳои моновариантӣ, ки ҳангоми трансформатсияи нуқтаҳои чоргона (ҷадвали 3) ба вучуд омадаанд, ки дар он яке аз фазаҳои саҳти мувозинатӣ тафовуд дорад, оварда шудааст:



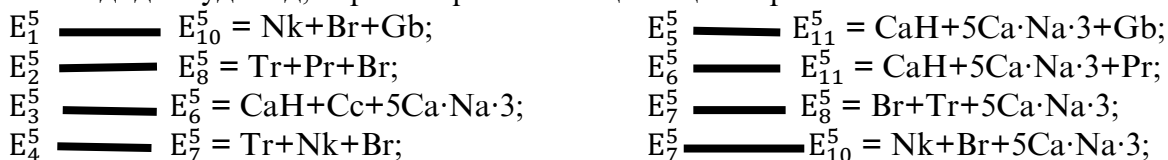
Тавре ки аз расми 7 (г) дида мешавад, байни нуқтаҳои нонвариантӣ хатҳои гуногуншакл мегузаранд: байни нуқтаҳои нонвариантии чоркомпонента - дар шакли хатҳои борики яклухт; байни нуқтаҳои нонвариантии чоркомпонента ба панҷкомпонента - дар шакли хатҳои пунктирӣ бо тирчаҳо; байни нуқтаҳои нонвариантии панҷгона - дар шакли хатҳои ғафси яклухт.

Хатҳое, ки байни нуқтаҳои нонвариантии чоргона мегузаранд, хатҳои моновариантии сатҳи таркиби чоркомпонентаи системаи таҳқиқшаванда мебошанд. Хатҳои пунктирӣ, ки байни нуқтаҳои нонвариантии чоркомпонента ва панҷкомпонента мегузаранд, хатҳои моновариантии сатҳи таркиби панҷкомпонентагиро ифода мекунанд. Ин хатҳо дар натиҷаи транслятсияи нуқтаҳои нонвариантии чоркомпонентаи мувофиқ ба сатҳи таркиби панҷкомпонента ба вучуд омадаанд ва тирча самти транслятсияро нишон медиҳад. Хатҳои ғафси яклухт низ хатҳои моновариантии сатҳи таркиби панҷкомпонентаро инъикос мекунанд ва онҳо байни нуқтаҳои нонвариантии панҷкомпонента мегузаранд.

Хатҳои моновариантӣ, ки дар расми 7 (г) нишон дода шудаанд, на танҳо аз рӯи шакл, балки аз рӯи таркиби фазавии фазаҳои саҳти мувозинатии ҳоси онҳо низ фарқ мекунанд. Хатҳои моновариантӣ, ки байни нуқтаҳои нонвариантии чоргона мегузаранд, бо фазаҳои саҳти мувозинатии зерин ҳосанд:



Барои хатҳои моновариантии сатҳи таркиби панҷкомпонента, ки байни нуқтаҳои нонвариантии панҷгона мегузаранд ва дар расми 7 (г) дар шакли хатҳои ғафси яклухт нишон дода шудаанд, таркиби фазавии таҳшинҳои зерин ҳос аст:



$$\begin{aligned} E_4^5 & \text{-----} E_9^5 = \text{Tr} + \text{CaH} + \text{Br}; \\ E_5^5 & \text{-----} E_{10}^5 = \text{Gb} + 5\text{Ca} \cdot \text{Na} \cdot 3 + \text{Br}; \end{aligned}$$

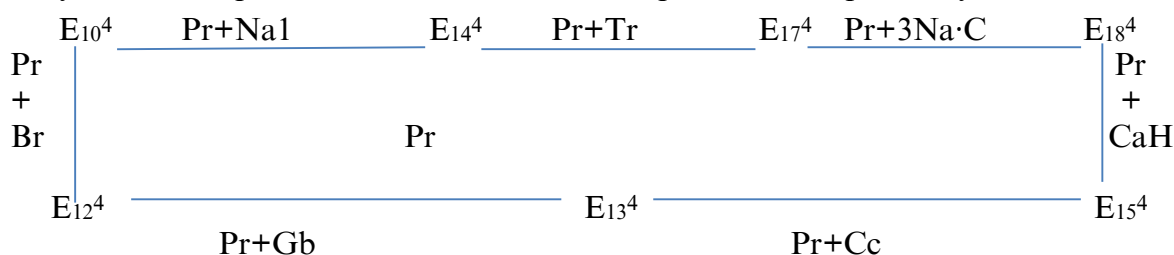
$$\begin{aligned} E_8^5 & \text{-----} E_{12}^5 = \text{Pr} + 5\text{Ca} \cdot \text{Na} \cdot 3 + \text{Tr}; \\ E_9^5 & \text{-----} E_{12}^5 = \text{Pr} + \text{Tr} + \text{CaH}; \\ E_{11}^5 & \text{-----} E_{12}^5 = \text{CaH} + 5\text{Ca} \cdot \text{Na} \cdot 3 + \text{Pr}. \end{aligned}$$

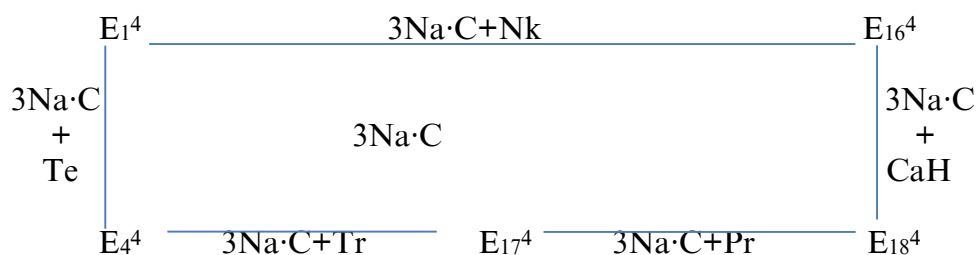
Ташаккули намуди дигари хатҳои моноварианти бо трансформатсияи нуқтаҳои нонвариантии сатҳи таркиби панҷкомпонента (табдил ёфтани онҳо ба хатҳои моноварианти) ҳангоми транслятсия алоқаманд аст. Ин хатҳо дар сатҳи таркиби панҷкомпонента ҳангоми илова кардани компоненти панҷум ба системаҳои чоркомпонентаи ибтидоии таркибёбанда ба вуҷуд меоянд. Дар системаи мазкур мо муайян намудем, ки нуқтаҳои нонвариантии чоргона, ки дар таркиби худ мавҷуданд, ҳангоми транслятсия ба сатҳи таркиби панҷкомпонента, ба хатҳои моноварианти табдил ёфта, дар ташаккули нуқтаҳои нонвариантии панҷгонаи зерин иштирок мекунанд:

$E_1^4 \text{-----} E_1^5;$	$E_2^4 \text{-----} E_2^5;$
$\text{Te} + \text{Nk} + \text{Br}$	$\text{NaI} + \text{Tr} + \text{Br}$
$E_3^4 \text{-----} E_7^5;$	$E_4^4 \text{-----} E_3^5;$
$\text{Nk} + \text{Tr} + \text{Br}$	$\text{Gp} + \text{Cc} + \text{CaH}$
$E_5^4 \text{-----} E_1^5;$	$E_6^4 \text{-----} E_3^5;$
$\text{Nk} + \text{Te} + \text{Gb}$	$\text{CaH} + 5\text{Ca} \cdot \text{Na} \cdot 3 + \text{Gp}$
$E_7^4 \text{-----} E_4^5$	$E_8^4 \text{-----} E_5^5;$
$\text{Nk} + \text{CaH} + \text{Gb}$	$\text{CaH} + \text{Gb} + 5\text{Ca} \cdot \text{Na} \cdot 3$
$E_9^4 \text{-----} E_1^5;$	$E_{10}^4 \text{-----} E_2^5;$
$\text{Te} + \text{Br} + \text{Gb}$	$\text{NaI} + \text{Br} + \text{Pr}$
$E_{11}^4 \text{-----} E_3^5;$	$E_{12}^4 \text{-----} E_5^5;$
$\text{Gp} + \text{Cc} + 5\text{Ca} \cdot \text{Na} \cdot 3$	$5\text{Ca} \cdot \text{Na} \cdot 3 + \text{Gb} + \text{Br}$
$E_{13}^4 \text{-----} E_6^5;$	$E_{14}^4 \text{-----} E_8^5;$
$5\text{Ca} \cdot \text{Na} \cdot 3 + \text{Pr} + \text{Cc}$	$\text{Br} + \text{Pr} + 5\text{Ca} \cdot \text{Na} \cdot 3$
$E_{15}^4 \text{-----} E_2^5;$	$E_{16}^4 \text{-----} E_4^5;$
$\text{NaI} + \text{Tr} + \text{Pr}$	$\text{Tr} + \text{Nk} + \text{CaH}$
$E_{17}^4 \text{-----} E_6^5;$	$E_{18}^4 \text{-----} E_9^5.$
$\text{Pr} + \text{CaH} + \text{Cc}$	$\text{Pr} + \text{CaH} + \text{Cc}$

Маълум гардид, ки дар диаграммаи муттаҳидшудаи комплекси фазавии системаи таҳқиқшаванда дар сатҳи таркибҳои чор-панҷкомпонента, хатҳои моновариантии зерин амалӣ мешаванд: 27 хатти моноварианти байни нуқтаҳои нонвариантии чоргона; 13 хатти моноварианти байни нуқтаҳои нонвариантии панҷгона (таъкид мешавад, ки ин низ байни нуқтаҳои панҷгона аст, ки метавонад ба таркиби дигари фазавӣ ё роҳҳои дигари ташаккул ишора кунад); 18 хатти моноварианти байни нуқтаҳои нонвариантии чоргона ва панҷгона.

Мувозинатҳои диварианти дар системаи бисёркомпонентаи Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, CO_3^{2-} , $\text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$. Табиист, ки ҳар қадар нуқтаҳои нонвариантии ва хатҳои моновариантии бештар дар маҳдудсозии майдонҳои диварианти иштирок кунанд, ҳамон қадар қисмҳои зиёди системаи мавриди таҳқиқро ин майдонҳо ишғол мекунанд. Масалан, дар маҳдудсозии майдони диварианти бо фазаҳои саҳти мувозинатии Pr (расми 7 (д)) 7 нуқтаи нонвариантии ва 7 хатти моновариантии иштирок мекунанд, дар ҳоле ки дар маҳдудсозии майдони диварианти бо фазаҳои саҳти мувозинатии $3\text{Na} \cdot \text{C}$ панҷ нуқтаи нонвариантии ва панҷ хатти моновариантии иштирок мекунанд:



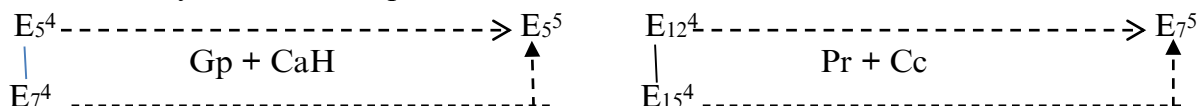


Ин далел, нишон медиҳад, ки майдони дивариантии аввал дар шароити зикршуда қисми зиёди системаро ишғол мекунад назар ба майдони дивариантии дуюм.

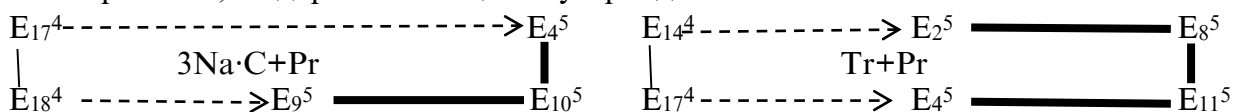
Ҳангоми гузаштани система аз сатҳи чоркомпонента ба сатҳи панҷкомпонента (масалан, бо илова кардани компоненти панҷум ба яке аз панҷ системаи чоркомпонента), табдилёбии шаклҳои геометрии системаҳои чоркомпонента бо транслятсияи минбаъдаи онҳо ба сатҳи таркиби панҷкомпонента ба амал меояд. Баъдан, шаклҳои геометрии транслятсияшуда дар ташаккули унсурҳои сохтори диаграммаи системаи таҳқиқшаванда дар сатҳи панҷкомпонента иштирок мекунад.

Мувофиқи вазифаи гузошташуда, мо мисолҳои ташаккули майдонҳои дивариантӣ ва имкониятҳои муайянкунии роҳи кристаллизатсияи фазаҳои сахтро аз рӯи сохтори онҳо дида мебароем. Ташаккули майдонҳои дивариантӣ дар сатҳи таркиби панҷкомпонента бо ду роҳ амалӣ мегардад. Роҳи аввал ба транслятсияи хатҳои моновариантии сатҳи таркиби чоркомпонента ба сатҳи таркиби панҷкомпонента алоқаманд аст. Роҳи дуюм бо маҳдудсозии сатҳи система бо нуқтаҳои нонвариантии панҷгона ва хатҳои моновариантие, ки дар байни онҳо мегузаранд, алоқаманд аст. Майдонҳои дивариантӣ, ки дар натиҷаи транслятсияи хатҳои моновариантии сатҳи таркиби чоркомпонента ба сатҳи таркиби панҷкомпонента ба вуҷуд омадаанд, метавонанд бо инҳо маҳдуд шаванд (расми 7, д):

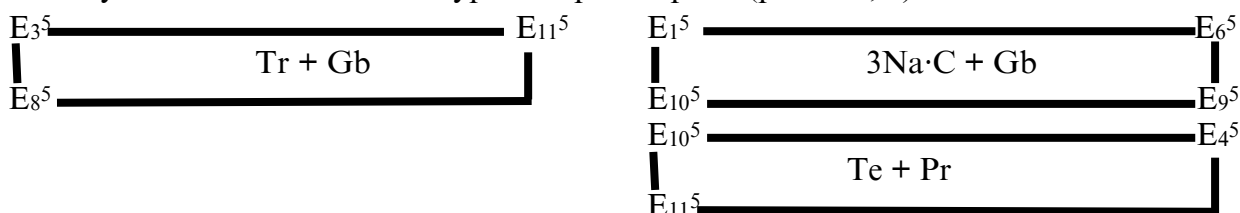
а) Нуқтаҳои нонвариантии панҷгона - хатҳои моновариантие, ки дар байни онҳо мегузаранд ва дар натиҷаи транслятсияи нуқтаҳои нонвариантии чоргона ба вуҷуд омадаанд - нуқтаҳои нонвариантии панҷгона. Мисол:



б) Нуқтаҳои нонвариантии панҷгона – хатҳои моновариантие, ки дар байни онҳо мегузаранд – хатҳои моновариантие, ки дар натиҷаи транслятсияи нуқтаҳои нонвариантии чоргона ба вуҷуд омадаанд – нуқтаҳои нонвариантии панҷгона – хатҳои моновариантие, ки дар байни онҳо мегузаранд. Масалан:

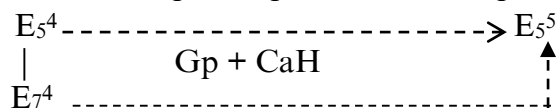


Таҳлили сохтори диаграммаи комплекси фазавии системаи Na^+ , $Ca^{2+}||SO_4^{2-}$, CO_3^{2-} , $HCO_3^- - H_2O$ дар $100^\circ C$ нишон медиҳад, ки бо роҳи дуюм се (3) майдони дивариантӣ ташаккул меёбанд ва онҳо контурҳои зерин доранд (расми 7, д):



Принсипҳои ташаккули шаклҳои геометрӣ, бахусус майдонҳои дивариантӣ, на танҳо барои фаҳмидани қонуниятҳои, ки сохтори диаграммаи системаҳои физико-химиявии бисёркомпонентаро муайян мекунад, аҳамияти илмӣ-назариявӣ доранд, балки барои ҳалли масъалаҳои амалӣ, махсусан ҳангоми муайян кардани роҳҳои имконпазири кристаллизатсияи фазаҳои сахт, ниҳоят муҳиманд. Масалан, агар нуқтаи

фигуративии таркиби фрагменти гипс ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) системаи мавриди таҳқиқ дар 100°C дар оғози буғшавии изотермӣ дар майдони дивариантӣ чойгир бошад

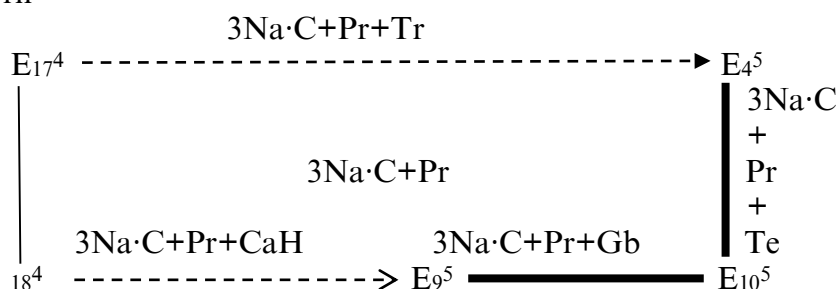


он ду имконият аз рӯи шумораи хатҳои моновариантӣ сатҳи таркиби панҷкомпонента, ки ин майдонро маҳдуд мекунанд барои идомаи роҳи кристаллизатсия вучуд дорад:

- дар самти хатти моновариантӣ E_5^4 -- E_5^5 , ки пас аз расидан ба он Gb (глауберит) ҳамчун фазаи чоруми саҳти мувозинатӣ кристаллизатсия мешавад;
- дар самти хатти моновариантӣ E_7^4 -- E_5^5 , ки пас аз расидан ба он Cc (калсит) ҳамчун фазаи чоруми саҳти мувозинатӣ кристаллизатсия мешавад.

Баъдан, роҳи кристаллизатсия дар нуқтаи нонвариантӣ E_5^5 бо фазаҳои саҳти мувозинатӣ $\text{Gp} + \text{Cc} + \text{CaH} + \text{Gb}$ ба итмом мерасад.

Ҳангоми чойгиршавии нуқтаи фигуративии таркиби омехта дар майдони дивариантӣ



имкониятҳои роҳҳои кристаллизатсияи фазаи чоруми саҳти мувозинатӣ се то мешаванд аз рӯи шумораи хатҳои моновариантӣ сатҳи таркиби панҷкомпонента. Сипас, роҳи кристаллизатсия дар яке аз се нуқтаи нонвариантӣ панҷгона ба итмом мерасад.

Масалан, ҳангоми расидан ба хатти моновариантӣ $\text{E}_{17}^4\text{E}_4^5$ дар роҳи кристаллизатсия, фазаи сеюми саҳти мувозинатӣ Tr (трона) хоҳад буд ва кристаллизатсия дар нуқтаи нонвариантӣ E_4^5 бо фазаҳои саҳти мувозинатӣ $3\text{Na} \cdot \text{C} + \text{Pr} + \text{Tr}$ ба итмом мерасад. Ҳангоми расидан ба хати моновариантӣ $\text{E}_{18}^4\text{E}_9^5$ дар роҳи кристаллизатсия, фазаи сеюми саҳти мувозинатӣ CaH – гидрокарбонати калсий хоҳад буд ва кристаллизатсия дар нуқтаи нонвариантӣ E_9^5 бо фазаҳои саҳти мувозинатӣ $3\text{Na} \cdot \text{C} + \text{Pr} + \text{CaH}$ ба итмом мерасад.

Ҳангоми расидан ба хатҳои моновариантӣ $\text{E}_9^5\text{E}_{10}^5$ ё $\text{E}_4^5\text{E}_{10}^5$ дар роҳи кристаллизатсия, ҳаракати минбаъдаи он аз раванди сершавии маҳлули фазаи чоруми саҳти мувозинатӣ вобаста аст. Масалан, агар ҳангоми расидан ба хатти моновариантӣ $\text{E}_9^5\text{E}_{10}^5$ раванди сершавии маҳлул бо афзоиши консентратсияи маҳлул аз ҳисоби трона (Tr) ҳамроҳӣ шавад, пас роҳи кристаллизатсия ба самти нуқтаи нонвариантӣ панҷгонаи E_9^5 равона карда мешавад, ки пас аз расидан ба он фазаҳои саҳти мувозинатӣ $3\text{Na} \cdot \text{C} + \text{Pr} + \text{CaH} + \text{Gb}$ хоҳанд буд. Агар пас аз расидан ба хатти моновариантӣ $\text{E}_4^5\text{E}_{10}^5$ раванди сершавии маҳлул бо афзоиши консентратсияи маҳлул аз ҳисоби тенардит (Te) ҳамроҳӣ шавад, пас роҳи кристаллизатсия ба самти нуқтаи нонвариантӣ шашгонаи E_{10}^5 равона карда мешавад, ки пас аз расидан ба он фазаҳои саҳти мувозинатӣ $3\text{Na} \cdot \text{C} + \text{Pr} + \text{Te} + \text{Gb}$ хоҳанд буд.

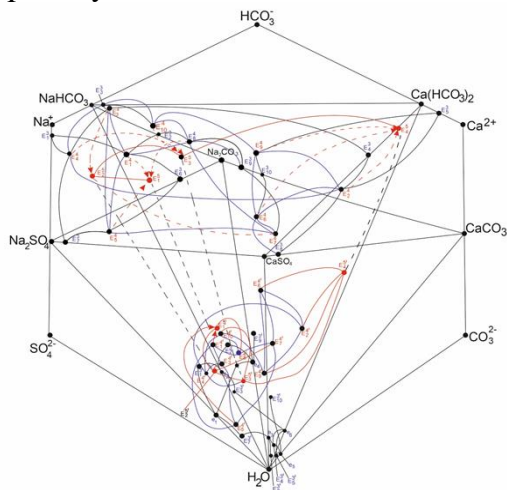
Ҳалшавандагии системаи муовизаи панҷкомпонентаи Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, CO_3^{2-} , HCO_3^- - H_2O дар ҳарорати 0°C . Дар ҳарорати 0°C дар системаи Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, CO_3^{2-} , HCO_3^- - H_2O фазаҳои саҳти мувозинатӣ $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ - мирабилит (Mb); $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ - гипс (Gp); $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{CaCO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ - гейлюссит (Gl); CaCO_3 - калсит (Cc); $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ - декагидрати карбонати натрий (Na10); NaHCO_3 - нахколит (Nk); $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ - гидрокарбонати калсий (CaH) ба таҳшин меафтанд. Дар ҷадвали 11 маълумот дар бораи ҳалшавии пайвастагиҳои инфиродӣ, дар нуқтаҳои нонвариантӣ системаи

тахқиқшаванда дар сатҳи таркиби секомпонентӣ, чоркомпонентӣ ва панҷкомпонентӣ, ки аз ҷониби мо муайян гардидааст, оварда шудааст.

Чадвали 11 – Ҳалшавандагии нуқтаҳои системаи Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, CO_3^{2-} , HCO_3^- - H_2O дар ҳарорати 0°C

№ нуқта	Таркиби фазаи моеъ, мас.%							Таркиби фазаҳои таҳшин
	Na_2SO_4	NaHCO_3	CaSO_4	Na_2CO_3	CaCO_3	$\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$	H_2O	
e ₁	4.30	-	-	-	-	-	95.70	Mb
e ₂	-	6.49	-	-	-	-	93.51	Nk
e ₃	-	-	0.176	-	-	-	99.824	Gp
e ₄	-	-	-	6.57	-	-	93.43	Na10
e ₅	-	-	-	-	0.0031	-	99.9969	Cc
e ₆	-	-	-	-	-	0.144	99.856	CaH
E ₁ ³	2.73	5.58	-	-	-	-	91.69	Mb+Nk
E ₂ ³	-	4.60	-	5.60	-	-	89.80	Nk+Na10
E ₃ ³	-	4.890	-	-	-	0.109	95.001	Nk+CaH
E ₄ ³	-	-	0.217	-	-	0.417	99.366	Gp+CaH
E ₅ ³	-	-	-	-	0.0097	0.219	99.6836	Cc+CaH
E ₆ ³	2.80	-	-	6.00	-	-	91.20	Mb+Na10
E ₇ ³	4.34	-	0.196	-	-	-	95.464	Gp+Mb
E ₈ ³	-	-	0.200	-	0.0045	-	99.7955	Cc+Gp
E ₉ ³	-	-	-	12.00	0.0049	-	87.9951	Gl+Na10
E ₁₀ ³	-	-	-	4.30	0.0048	-	95.6952	Cc+Gl
E ₁ ⁴	2.12	4.37	-	5.13	-	-	88.38	Mb+Na10+Nk
E ₂ ⁴	-	-	0.217	-	0.0014	0.830	98.9516	Gp+Cc+CaH
E ₃ ⁴	-	4.865	0.131	-	-	0.153	94.851	Gp+Nk+CaH
E ₄ ⁴	3.43	5.22	0.326	-	-	-	91.024	Mb+Gp+Nk
E ₅ ⁴	1.196	-	0.244	1.551	-	-	96.238	Mb+Na10+Gp
E ₆ ⁴	-	-	0.272	11.30	0.00465	-	88.4233	Gp+Gl+Cc
E ₇ ⁴	-	-	0.340	18.30	0.0125	-	81.3475	Na10+Gl+Gp
E ₈ ⁴	-	2.443	-	6.167	0.0065	-	91.3835	Na10+Nk+Gl
E ₉ ⁴	-	-	-	5.904	0.0057	0.308	93.7823	Cc+Gl+CaH
E ₁₀ ⁴	-	5.896	-	5.510	-	0.190	88.404	Gl+Nk+CaH
E ₁ ⁵	5.37	4.69	-	5.76	0.0061	-	84.1739	Nk+Mb+Na10+Gl
E ₂ ⁵	3.42	5.16	0.312	7.26	0.0042	-	83.8438	Nk+Mb+Gp+Gl
E ₃ ⁵	-	3.83	0.274	4.41	0.0059	0.201	91.2791	Nk+CaH+Gp+Gl
E ₄ ⁵	-	-	0.265	6.53	0.0047	0.206	92.9943	Gp+Cc+CaH+Gl

Дар асоси маълумоти чадвали 11 мо диаграммаи ҳалшавандагии системаи чоркомпонентии Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, CO_3^{2-} , HCO_3^- - H_2O -ро дар ҳарорати 0°C тартиб додем, ки дар расми 17 оварда шудааст.



Расми 17. – Диаграммаи ҳалшавандагии системаи Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, CO_3^{2-} , HCO_3^- - H_2O дар 0°C

Тарзҳои ҳосилкунии фазаҳои алоҳида аз таркиби партовҳои моеъи истеҳсоли алюминий. Усули ҳосилкунии декагидрати карбонати натрий. Кори мазкур ба усулҳои коркарди маъданҳои полеминералии дорои кристаллогидрати карбонати натрий, хусусан барои ба даст овардани декагидрати карбонати натрий аз партовҳои моеъи истеҳсоли алюминий тааллуқ дорад. Ҳадаф ба даст овардани декагидрати карбонати натрий аз партовҳои моеъи истеҳсоли ашёи хоми техникӣ, ки таркибашон карбонатҳо, гидрокарбонатҳои, натрий ва калсий доранд, аз ҷумла партовҳои моеъи истеҳсоли алюминий мебошад.

Мақсади гузошташуда бо роҳи коркарди маъданҳои полеминералии дорои натрий, ки дар маҳлулҳои ишқорӣ гарми гардишӣ ҳал карда шудаанд, ба даст оварда мешавад. Пас аз ҷудо кардани боқимондаи ҳалнашаванда, онро бо таносуби м/с 0,61:0,76 дар давоми 40-100 дақиқа ва дар ҳарорати 0-50 °С коркард меkunанд. Илова бар ин, маҳлули ишқорӣ, ки аз коркарди боқимонда пас аз ғафсшавӣ ва тозакунии ба даст меояд, барои ҳал кардани маҳлулҳои модарӣ баргардонида мешавад.

Аз диаграммаи ҳолати системаи Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{CO}_3^{2-}$, HCO_3^- - H_2O дида мешавад, ки дар 0 °С (расми 15 (а)) декагидрати карбонати натрий бо фазаҳои гейлюсит ва нахколит ҳамсарҳад аст ва қобилияти ҳамнишастагӣ дар нуқтаҳои нонвариантии сатҳи секомпонентӣ дорад. Аммо, дар ҳарорати 25 °С мувозинати фазавии декагидрати карбонати натрий тағйир меёбад ва бо баланд шудани ҳарорат аз 0 то 50 °С пайдоиши фазаи нави трона мушоҳида мешавад, ки сохтори диаграммаи системаи дар боло зикршударо тағйир медиҳад (расми 15 (б)) ва дар натиҷа декагидрати карбонати натрий бо фазаҳои гейлюсит ва трона ҳамсарҳад мешавад, ки онҳо метавонанд дар нуқтаҳои таҳшинии сатҳи секомпонента якҷоя таҳшин шаванд.

Ҳалшавандагӣ дар шаклҳои геометрии системаи Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{CO}_3^{2-}$, HCO_3^- - H_2O дар 50 °С нишон дода шудааст, ки тағйирёбии маълумоти бадастомада нисбат ба изотермаҳои 0 ва 25 °С дида мешавад. Аз ҷумла, зиёд шудани ҳалшавандагии декагидрати карбонати натрий аз 6,570 ва 22,95% мас. дар 0 ва 25 °С мутаносибан то 32,10% дар 50 °С.

Муқоиса кардани тағйироти ҳалшавии намакҳо дар нуқтаҳои нонвариантии, ки дар он ҷо се фазаи саҳт дар ҳолати мувозинат қарор доранд, имконнопазир аст, зеро бо баланд шудани ҳарорат таркиби фазавии таҳшинҳо тағйир меёбад. Аз ҷумла, дар 50 °С дегидратсияи декагидрати карбонати натрий ($\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) ба моногидрати карбонати натрий ($\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$) мегузарад ва фазаҳои нави саҳти мувозинатӣ - гейлюсит ($\text{CaCO}_3 \cdot \text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) ва пирсонит ($\text{CaCO}_3 \cdot \text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) пайдо мешаванд. Аз ин нуқтаи назар, агар маҳлули модарии системаи чоркомпонента, ки аз карбонатҳо, гидрокарбонатҳои, натрий ва калсий иборат аст, аз нав кристалл карда шавад, аз маҳлули модарӣ 25,53 г декагидрати карбонати натрийро ҷудо кардан мумкин аст, зеро ҳалшавии $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ дар 50 °С 32,1 г, дар 25 °С 22,95 г-ро ташкил медиҳад ва дар 0 °С маҳлул 6,750 г $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ дорад, дар натиҷаи аз нав кристалл кардани он 16,38 г $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ таҳшин ва ҷудо мешавад.

Мисоли 1. 15 кг маҳлули модарии ашёи хоми техникӣ, ки таркибаш аз карбонатҳо, гидрокарбонатҳо, натрий ва калсий иборат аст, дар ҳарорати 0 °С дар тӯли 40 дақиқа бо маҳлулҳои ишқорӣ бо усули маълум коркардшуда, коркард карда мешавад. Маҳлул ғафс карда шуда, маҳлули ишқорӣ сер аз боқимонда тоза карда мешавад. Боқимондаи гарм ба миқдори 4,8541 кг бо таркиби зерин (ба фоизи мас.): Na^+ 12,53053, Ca^{2+} 0,03747, CO_3^{2-} 12,9934, HCO_3^- 6,9274, боқимондаи ҳалнашаванда 10,1459 ва об дар ҳарорати 50 °С дар тӯли 100 дақиқа коркард карда мешавад. Пас аз тоза кардани маҳлул бо маҳлули спирти этил ва филтратсия, 4,8541 кг маҳлули ишқорӣ бо таркиби зерин (ба фоизи мас.): Na^+ 4,620, Ca^{2+} 0,03676, CO_3^{2-} 3,7206, HCO_3^- 4,8213 ва боқимонда об, инчунин 4,30 кг боқимондаи ҳалнашаванда, ки асосан аз нахколит, трона, калсит ва гидрокарбонати калсий иборат аст, ба даст оварда мешавад. Филтрат ба сикли истеҳсолот баргардонида мешавад. Истихроҷи умумии декагидрати карбонати натрий аз маҳлули ишқорӣ 61,02% -ро ташкил медиҳад (ниг. ҷадвали 9).

Мисоли 2. 20 кг маҳлули модарии ашёи хоми техникӣ, ки таркибаш аз карбонатҳо, гидрокарбонатҳои, натрий ва калсий иборат аст, дар ҳарорати 25 °C дар тӯли 40 дақиқа бо усули маълум коркард карда мешавад. Маҳлул ғафс карда шуда, маҳлули ишқорӣ сер аз боқимонда тоза карда мешавад. Боқимондаи гарм ба миқдори 6,4721 кг бо таркиби зерин (бо ҳиссаи масса): Na^+ 13,6741, Ca^{2+} 0,05142, CO_3^{2-} 14,5738, HCO_3^- 7,4251, боқимондаи ҳалнашаванда 13,5278 кг ва об дар ҳарорати 50 °C дар тӯли 100 дақиқа бо 5,7378 кг об коркард карда мешавад. Пас аз тоза кардани маҳлул бо маҳлули спирти этил ва филтратсия, 6,4721 кг маҳлули ишқорӣ бо таркиби зерин (бо ҳиссаи масса): Na^+ 2,506, Ca^{2+} 0,001174, CO_3^{2-} 2,5986, HCO_3^- 1,3661 ва 8,9386 об, инчунин 1,8908 кг боқимондаи ҳалнашаванда, ки асосан аз нахколит, трона, калсит ва гидрокарбонати калсий иборат аст, ба даст оварда мешавад. Филтрат ба даври истехсолот баргардонида мешавад. Истихроҷи умумии декагидрати карбонати натрий аз маҳлули ишқорӣ 76,08%-ро ташкил медиҳад (ниг. ҷадвали 9).

Мисоли 3. 25 кг маҳлули модарии ашёи хоми техникӣ, ки таркибаш аз карбонатҳо, гидрокарбонатҳо, натрий ва калсий иборат аст, дар ҳарорати 50 °C дар тӯли 40 дақиқа бо усули маълум коркард карда мешавад. Маҳлул ғафс карда шуда, маҳлули ишқорӣ сер аз боқимонда тоза карда мешавад. Боқимондаи гарм ба миқдори 11,21 кг бо таркиби зерин (бо ҳиссаи масса): Na^+ 17,4072, Ca^{2+} 0,0062, CO_3^{2-} 18,1728, HCO_3^- 9,2352, боқимондаи ҳалнашаванда 13,79 кг ва об, дар ҳарорати 50 °C дар тӯли 100 дақиқа бо 5,7118 кг об коркард карда мешавад. Пас аз тоза кардани маҳлул бо маҳлули спирти этилӣ ва филтратсия, 11,21 кг маҳлули ишқорӣ бо таркиби зерин (бо ҳиссаи масса): Na^+ 4,8769, Ca^{2+} 0,03127, CO_3^{2-} 5,1794, HCO_3^- 2,3078 ва 9,653 об, инчунин 2,9610 кг боқимондаи ҳалнашаванда, ки асосан аз нахколит, трон, калсит ва гидрокарбонати калсий иборат аст, ба даст оварда мешавад. Филтрат ба даври истехсолот баргардонида мешавад. Истихроҷи умумии декагидрати карбонати натрий аз маҳлули ишқорӣ 80,20%-ро ташкил медиҳад (ниг. ҷадвали 9).

Усули пешниҳодшуда раванди коркарди маъданҳои полеминералии дорои натрийро содда мегардонад, зеро амалиёти хунуккунии боқимондаи ҳалнашаванда бо маҳлули ишқорӣ партов ва амалиёти шустани нахколит аз таркиби чоркомпонентӣ аз нақша хориҷ карда шудааст. Афзоиши миқдори декагидрати карбонати натрий аз ҳисоби истихроҷи он аз боқимондаи ҳалнашаванда дар сатҳи 2,295/100 кг маҳлули модарии партовҳои моеъи маҳлули ишқорӣ ба даст оварда мешавад, ки ин аз ҷадвал ва расми 15: а ва б-и ҳолати системаи чоркомпонентии Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{CO}_3^{2-}$, HCO_3^- - H_2O дида мешавад.

Усули ҳосилкунии нахколит. Оид ба бахши мазкур нахустпатент гирифта шудааст. Ин ихтироъ ба коркарди маъданҳои полеминералии дорои пайвастиҳои натрий, аз ҷумла барои ба даст овардани нахколит (NaHCO_3) аз партовҳои моеъи истехсоли алюминий тааллуқ дорад. Мақсади ин ихтироъ ба даст овардани нахколит аз партовҳои моеъи истехсоли алюминий мебошад, ки таркибашон аз сулфатҳо, карбонатҳо ва гидрокарбонатҳои натрий иборат аст.

Мақсади гузошташуда бо роҳи коркарди маъданҳои полеминералии дорои натрий, ки дар маҳлулҳои ишқорӣ гарми гардишӣ ҳал карда шудаанд, ба даст оварда мешавад. Пас аз ҷудо кардани боқимондаи ҳалнашаванда, онро бо таносуби м/с 0.51:0.73 дар давоми 45-100 дақиқа ва дар ҳарорати 0-50 °C коркарди термикӣ мекунад. Маҳлули ишқорӣ, ки аз коркарди боқимонда пас аз ғафсшавӣ ва тозакунии ба даст меояд, ба маҳлули модарии ибтидоӣ баргардонида мешавад.

Аз диаграммаи ҳолати системаи $5\text{Na}^+ - \text{SO}_4^{2-} - \text{CO}_3^{2-} - \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$ дида мешавад, ки дар 0 °C (расми 9 (а)) нахколит бо фазаҳои мирабилит ва декагидрати карбонати натрий ҳамсарҳад аст ва қобилияти якҷояшавӣ дар нуқтаҳои нонвариантии сатҳи секомпонентӣ дорад. Бояд қайд кард, ки дар ҳарорати 25 °C мувозинати фазагии нахколит тағйир меёбад ва бо баланд шудани ҳарорат аз 0 то 50 °C пайдоиши фазаи нави трона мушоҳида мешавад, ки сохтори диаграммаи системаи дар боло зикршударо тағйир медиҳад (расмҳои 9 б ва в).

Дар натиҷа, нахколит бо фазаҳои мирабилит ва трона ҳамсарҳад мегардад, ки онҳо имкон доранд дар нуктаҳои сатҳи секомпонентӣ якҷоя таҳшин шаванд. Ҳалшавандӣ дар шаклҳои геометрии системаи $\text{Na}_2\text{SO}_4\text{--Na}_2\text{CO}_3\text{--NaHCO}_3\text{--H}_2\text{O}$ дар $50\text{ }^\circ\text{C}$ нишон дода шудааст. Тағйирёбии маълумоти бадастомада нисбат ба изотермаҳои 0 ва $25\text{ }^\circ\text{C}$ дида мешавад. Бо баланд шудани ҳарорат аз 0 то $25\text{ }^\circ\text{C}$ ҳалшавии нахколит мутаносибан аз $6,49$ то $9,31\text{ }\%$ мас. меафзояд, дар ҳоле ки бо баланд шудани ҳарорат то $50\text{ }^\circ\text{C}$ ин нишондиҳанда то $12,70\text{ }\%$ меафзояд.

Муқоисаи тағйирёбии ҳалшавии намакҳо дар нуктаҳои нонварианти, ки дар онҳо се фазаи саҳт дар мувозинат қарор доранд, имконнопазир аст, зеро таркиби фазавии таҳшинҳо бо баланд шудани ҳарорат тағйир меёбад. Аз ҷумла, дар $50\text{ }^\circ\text{C}$ дегидратсияи декагидрати сульфати натрий ($\text{Na}_2\text{SO}_4\cdot 10\text{H}_2\text{O}$) ва декагидрати карбонати натрий ($\text{Na}_2\text{CO}_3\cdot 10\text{H}_2\text{O}$) ба тенардит (Na_2SO_4) ва моногидрати карбонати натрий ($\text{Na}_2\text{CO}_3\cdot \text{H}_2\text{O}$) мегузарад ва фазаҳои нави саҳти мувозинатии: трона ($\text{Na}_2\text{CO}_3\cdot \text{NaHCO}_3\cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ва беркеит ($\text{Na}_2\text{CO}_3\cdot 2\text{Na}_2\text{SO}_4$) пайдо мешаванд.

Аз ин нуктаи назар, агар маҳлули модарии системаи чоркомпонента, ки аз сульфатҳо, карбонатҳо ва гидрокарбонатҳои натрий иборат аст, аз нав кристалл карда шавад, аз он $6,21\text{ г}$ нахколит ҷудо кардан мумкин аст, зеро ҳалшавии NaHCO_3 дар $50\text{ }^\circ\text{C}$ мебошад. 25 ва $0\text{ }^\circ\text{C}$ мутаносибан $12,7$ ва $9,31\text{ г}$ -ро ташкил медиҳад. Дар натиҷаи аз нав кристаллизатсия $3,16\text{ г}$ NaHCO_3 таҳшин ва ҷудо мешавад.

Мисоли 1. 25 кг маҳлули модарии ашёи хоми техникӣ, ки таркибаш аз сульфатҳо, карбонатҳо, гидрокарбонатҳо ва натрий иборат аст, дар ҳарорати тақрибан $0\text{ }^\circ\text{C}$ дар тӯли 45 дақиқа бо маҳлулҳои ишқорӣ бо усули маълум коркардшуда, коркард карда мешавад. Маҳлул ғафс карда шуда, таҳшинҳои сер аз маҳлули ишқорӣ (н.о.) тоза карда мешавад. Боқимондаи гарм ба миқдори $13,4725\text{ кг}$ бо таркиби зерин (ба фоизи мас.): Na^+ $19,4936$, SO_4^{2-} $14,8176$, CO_3^{2-} $12,8488$, HCO_3^- $6,7608$, н.о. $11,5225$ ва об дар ҳарорати аз 25 то $0\text{ }^\circ\text{C}$ дар тӯли 100 дақиқа коркард карда мешавад. Пас аз тоза кардани маҳлул бо маҳлули спирти этилӣ ва филтратсия, $13,4775\text{ кг}$ маҳлули ишқорӣ бо таркиби зерин (ба фоизи мас.): Na^+ $5,9896$, SO_4^{2-} $2,9068$, CO_3^{2-} $3,6792$, HCO_3^- $4,7128$ ва боқимонда об, инчунин $9,155\text{ кг}$ таҳшинҳои ҳалнашаванда, ки асосан аз нахколит, мирабилит ва декагидрати карбонати натрий иборат аст, ба даст оварда мешавад. Филтрат ба даври истехсолот баргардонида мешавад. Истихроҷи умумии нахколит аз маҳлули ишқорӣ $51,10\text{ }\%$ -ро ташкил медиҳад.

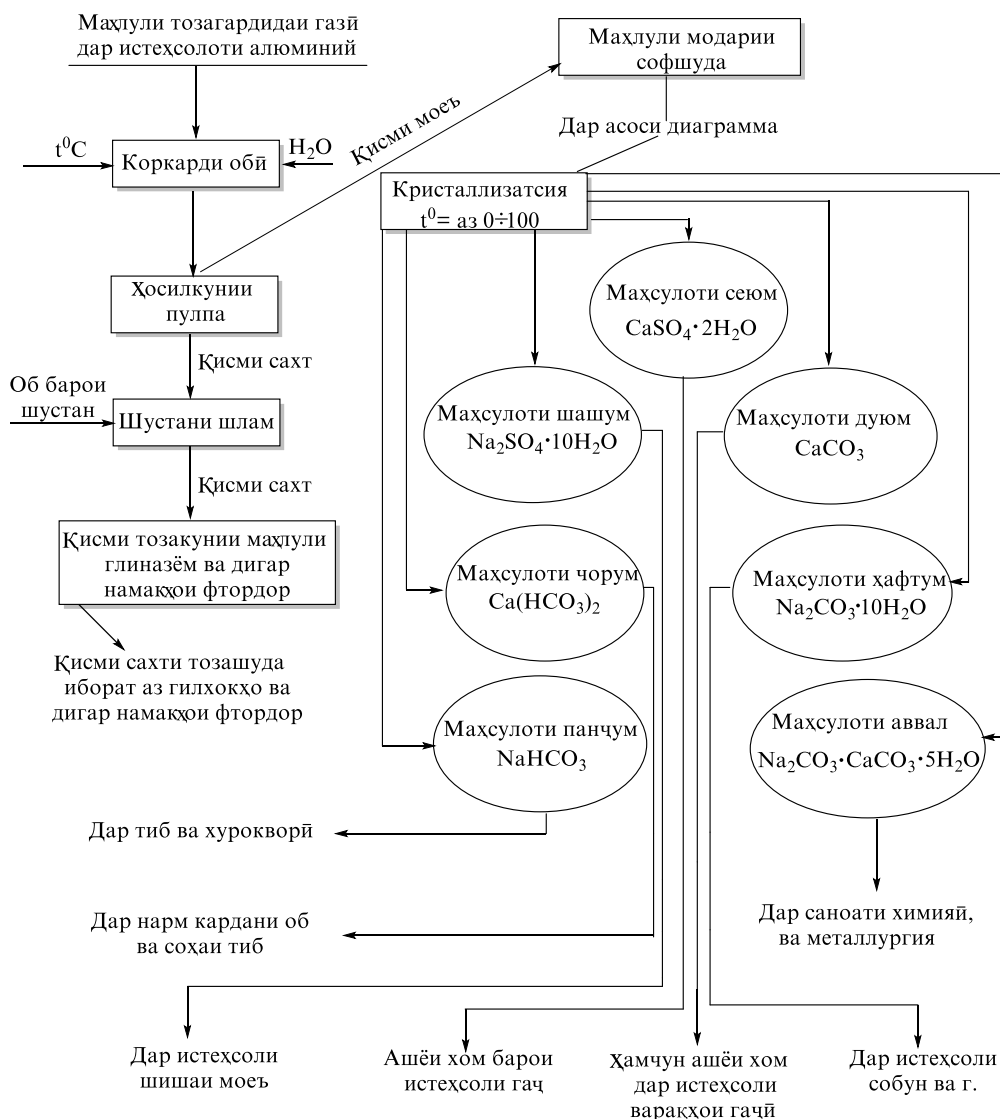
Мисоли 2. 25 кг маҳлули модарии ашёи хоми техникӣ, ки таркибаш аз сульфатҳо, карбонатҳо, гидрокарбонатҳо ва натрий иборат аст, дар ҳарорати тақрибан $25\text{ }^\circ\text{C}$ дар тӯли 45 дақиқа бо усули маълум коркард карда мешавад. Маҳлул ғафс карда шуда, маҳлули ишқорӣ сер аз боқимонда тоза карда мешавад. Боқимондаи гарм ба миқдори $19,15\text{ кг}$ бо таркиби зерин (ба фоизи мас.): Na^+ $27,7084$, SO_4^{2-} $21,4984$, CO_3^{2-} $18,1696$, HCO_3^- $9,2224$, боқимондаи ҳалнашаванда $5,85\text{ кг}$ ва об, дар ҳарорати аз 50 то $25\text{ }^\circ\text{C}$ дар тӯли 100 дақиқа бо $5,6725\text{ кг}$ об коркард карда мешавад. Пас аз тоза кардани маҳлул бо маҳлули спирти этилӣ ва филтратсия, $13,4775\text{ кг}$ маҳлули ишқорӣ бо таркиби зерин (ба фоизи мас.): Na^+ $19,4936$, SO_4^{2-} $14,8176$, CO_3^{2-} $12,8488$, HCO_3^- $6,7608$ ва $5,6725$ об, инчунин $5,68\text{ кг}$ таҳшинҳои ҳалнашаванда, ки асосан аз нахколит, трон, мирабилит ва декагидрати карбонати натрий иборат аст, ба даст оварда мешавад. Филтрат ба даври истехсолот баргардонида мешавад. Истихроҷи умумии нахколит аз маҳлули ишқорӣ $62,40\text{ }\%$ -ро ташкил медиҳад.

Мисоли 3. 25 кг маҳлули модарии ашёи хоми техникӣ, ки таркибаш аз сульфатҳо, карбонатҳо, гидрокарбонатҳо ва натрий иборат аст, дар ҳарорати тақрибан $50\text{ }^\circ\text{C}$ дар тӯли 45 дақиқа бо усули маълум коркард карда мешавад. Маҳлул ғафс карда шуда, маҳлули ишқорӣ сер аз боқимонда тоза карда мешавад. Боқимондаи гарм ба миқдори $19,15\text{ кг}$ бо таркиби зерин (ба фоизи мас.): Na^+ $27,7084$, SO_4^{2-} $21,4984$, CO_3^{2-} $18,1696$, HCO_3^- $9,2224$, боқимондаи ҳалнашаванда $5,85\text{ кг}$ ва об дар ҳарорати аз 50 то $0\text{ }^\circ\text{C}$ дар тӯли 100 дақиқа бо $14,8275\text{ кг}$ об коркард карда мешавад. Пас аз тоза кардани маҳлул бо маҳлули спирти этилӣ ва филтратсия, $14,8275\text{ кг}$ маҳлули ишқорӣ бо таркиби зерин

(ба фоизи мас.): Na^+ 5,9896, SO_4^{2-} 2,9068, CO_3^{2-} 3,6792, HCO_3^- 4,7128 ва 20,6775 об, инчунин 2,9610 кг таҳшини ҳалнашаванда бо табдилоти фазавӣ, ки асосан аз нахколит, мирабилит ва декагидрати карбонати натрий иборат аст, ба даст оварда мешавад. Филтрат ба даври истехсолот баргардонида мешавад. Истихроҷи умумии нахколит аз маҳлули ишқорӣ 73,30 %-ро ташкил медиҳад.

Усули пешниҳодшуда раванди коркарди маъданҳои полеминералии дорои натрийро содда мегардонад, зеро амалиёти хунуккунии боқимондаи ҳалнашаванда бо маҳлули ишқории партов ва амалиёти шустани нахколит аз таркиби чоркомпонентӣ аз нақша хориҷ карда шудааст.

Дар асоси диаграммаҳои сохташуда схемаи принципалии технологияи кристаллизатсияи моддаҳои химиявӣ аз партовҳои моеъи саноатии истехсоли алюминий, ки комплекси фазагии системаи чоркомпонентаи иборат аз сульфатҳо, карбонатҳо, гидрокарбонатҳои натрий ва об ($\text{H}_2\text{O}-5\text{Na}^+-\text{SO}_4^{2-}-\text{CO}_3^{2-}-\text{HCO}_3^-$) ташкил медиҳад, пешниҳод гардида, барои майдонҳо, хатҳо ва нуқтаҳо коркард карда шуда, дар расми 18 оварда шудааст. Мувофиқ ба он ифода гардидааст, ки дар майдонҳои диварианти як фаза, дар хатҳои моноварианти ду фаза ва дар нуқтаҳои нонварианти се фазаҳо дар мувозинат буда, зимни коркард дар шаклҳои номбурда моддаҳо ҳосил мешаванд. Моддаҳои ҳосилшуда метавонанд барои истифодаи дубора баргардонида шаванд. Чунки, ба мо маълум аст, ки мирабилит, сода ва нахколит дар саноат тадбиқи васеъ дорад.



Расми 18. – Схемаи принципалии технологияи раванди кристаллизатсияи фазаҳои саҳти алоҳида дар системаи $\text{H}_2\text{O}-5\text{Na}^+-\text{SO}_4^{2-}-\text{CO}_3^{2-}-\text{HCO}_3^-$

ХУЛОСАҲОИ УМУМӢ

1. Усули такмилёфтаи таҳқиқот, ки барои омӯзиши системаҳои бисёркомпонентаи обӣ-намакӣ пешниҳод шудааст, аз инҳо иборат аст: а) пешгуи мувозинати фазагӣ дар системаҳои бисёркомпонента, ки ба интиқоли ифодаҳои сохтори системаҳои чузъи иборат аз n компонент ба минтақаи системаи умумии иборат аз $n+1$ компонент асос ёфтааст; б) сохтани диаграммаҳои комплекси фазагии системаҳои бисёркомпонента, ки дар онҳо ҳамаи мувозинатҳои фазагии имконпазир дар шаклҳои геометрӣ ва ҷойгиршавии мутақобилаи онҳо нишон дода шудааст [11-М], [13-М], [15-М], [19-М], [29-М], [30-М], [36-М], [37-М], [38-М], [46-М], [68-М], [82-М], [85-М], [86-М], [99-М], [101-М].

2. Истифодаи усули мазкур бо таҳқиқоти назариявӣ ва таҷрибавии 25 изотермаи комплексҳои фазагии системаҳои чоркомпонента: $5\text{Na}^+ - \text{SO}_4^{2-} - \text{CO}_3^{2-} - \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$; $3\text{Ca}^{2+} - \text{SO}_4^{2-} - \text{CO}_3^{2-} - 2\text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$; $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}, \text{CO}_3^{2-} - \text{H}_2\text{O}$; $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$; $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+} \parallel \text{CO}_3^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$ ва 5 изотермаи системаи панҷкомпонентӣ $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}, \text{CO}_3^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$ тасдиқ карда шудааст [5-М], [6-М], [7-М], [9-М], [10-М], [12-М], [47-М], [50-М], [51-М], [55-М], [57-М], [63-М], [64-М], [70-М], [80-М], [81-М], [90-М], [93-М], [96-М], [97-М].

3. Аввалин нишон дода шудааст, ки афзоиши шумораи тасвирҳои геометрӣ бо баланд шудани ҳарорат аз 0 то 100 °C аломатҳои табодули мубодилаи химиявӣ бо пайдоиши фазаҳои нави мувозинатӣ алоқаманд аст, ки инро принципҳои асосии асосҳои таҳлили физико-химиявӣ ва қоидаи фазаҳои Гиббс мувофиқат мекунад [8-М], [31-М], [32-М], [39-М], [40-М], [41-М], [49-М], [54-М], [67-М], [74-М], [83-М], [92-М], [102-М].

4. Ҳамаи диаграммаҳои комплекси фазагии системаи иборат аз катионҳои натрий ва калсий, анионҳои сулфат, карбонат ва гидрокарбонат, ки бо усули транслятсия таҳқиқ гардида, сохта шудаанд, аз рӯи минтақаҳои кристаллизатсияи фазаҳои саҳти алоҳидаи сатҳи таркиби чоркомпонента ва кристаллизатсияи муштараки ду фазаи сатҳи таркиби панҷкомпонента фрагментатсия карда шудаанд. Дар натиҷаи он фрагментҳои ҳудуди як фаза барои сатҳи таркиби чоркомпонентагӣ ва ду фаза дар сатҳи таркиби панҷкомпонентагӣ муқаррар гардидааст [33-М], [35-М], [43-М], [44-М], [45-М], [46-М], [53-М], [84-М], [87-М], [100-М], [103-М], [112-М].

5. Қонуниятҳои умумии сохтори диаграммаҳои комплекси фазагии системаҳои бисёркомпонентаи обӣ-намакӣ: а) нуқтаҳои нонвариантии системаи умумӣ асосан аз буриши қачхатҳои моновариантӣ, ки аз нуқтаҳои нонвариантии фазаҳои якхела сарчашма мегиранд, ҳосил мешаванд (*транслятсияи сетарафа*). Дар ҳолатҳои камтар, онҳо аз буриши қачхатҳои моновариантӣ, ки аз нуқтаи нонвариантии системаҳои чузъӣ сарчашма мегирад, бо қачхатҳои моновариантӣ, ки аз байни нуқтаҳои нонвариантии системаи умумӣ мегузаранд, ба вучуд меоянд (*транслятсияи яктарафа*). Нуқтаҳои нонварианта, инчунин аз буриши қачхатҳои моновариантӣ, ки танҳо аз байни нуқтаҳои нонвариантии системаи умумӣ мегузаранд, ба вучуд меоянд (*нуқтаҳои мобайнӣ*). б) қачхатҳои моновариантӣ асосан дар натиҷаи транслятсияи нуқтаҳои нонвариантии системаҳои чузъӣ ба минтақаи таркиби умумӣ ба вучуд меоянд ва дар ҳолатҳои камтар дар натиҷаи буриши майдонҳои дивариантӣ дар минтақаи таркиби умумии система пайдо мешаванд; в) майдонҳои дивариантӣ асосан дар натиҷаи транслятсияи қачхатҳои моновариантии системаҳои чузъӣ ба минтақаи таркиби умумӣ ба вучуд меоянд. Баъзан, онҳо ҳангоми транслятсияи қачхатҳои моновариантӣ, ки аз байни нуқтаҳои нонвариантии системаҳои чузъӣ якхела мегузаранд. Инчунин, дар натиҷаи бо қачхатҳои моновариантӣ, ки танҳо дар минтақаи таркиби умумӣ ($n+1$) мегузаранд, ба вучуд меоянд [1-М], [2-М], [3-М], [22-М], [23-М], [48-М], [58-М], [60-М], [65-М], [66-М], [69-М], [71-М], [98-М], [104-М], [108-М], [111-М], [117-М].

6. Дар асоси маълумот дар бораи сохтори изотермаҳои мувозинати фазаӣ ва роҳҳои кристаллизатсия дар таҳқиқоти системаҳои обӣ-намакӣ, инчунин маълумоти тавсифи риёзии ҷараёни моделии раванд, усулҳои зерини оптимизатсияи ҷузъҳои технологияи коркарди маъдани полиминералӣ (партовҳои истехсоли) таҳия карда шудаанд: усули ба даст овардани декагидрати карбонати натрий аз партовҳои моеъи истехсоли алюминий; усули ба даст овардани нахколит аз партовҳои моеъи истехсоли алюминий; усули ба даст овардани виломит аз партовҳои моеъи истехсоли алюминий пешниҳод карда шудаанд [4-М], [56-М], [61-М], [72-М], [73-М], [75-М], [76-М], [77-М], [78-М], [79-М], [94-М], [107-М], [113-М], [115-М], [116-М], [118-М].

7. Бо усули ҳалшавандагӣ, диаграммаҳои ҳолати системаҳои чоркомпонентаи зерин дар диапазонаи 0-100 °C таҳқиқ ва сохта шудаанд: $5\text{Na}^+ - \text{SO}_4^{2-} - \text{CO}_3^{2-} - \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$; $3\text{Ca}^{2+} - \text{SO}_4^{2-} - \text{CO}_3^{2-} - 2\text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$; $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}, \text{CO}_3^{2-} - \text{H}_2\text{O}$; $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$; $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+} \parallel \text{CO}_3^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$, инчунин, диаграммаи системаи панҷкомпонентаи $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}, \text{CO}_3^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$ дар 0 °C. Маълумоти таҷрибавии бадастомада, ки дурустии онҳо бо усулҳои таҳлили химиявӣ, кристаллооптикӣ ва рентгенофазаӣ тасдиқ шудааст, бо маълумоте, ки бо усули транслатсия ба даст омадаанд, пурра мувофиқат мекунад [14-М], [16-М], [17-М], [18-М], [20-М], [21-М], [24-М], [25-М], [26-М], [27-М], [28-М], [33-М], [38-М], [42-М], [52-М], [59-М], [62-М], [88-М], [89-М], [91-М], [95-М], [105-М], [106-М], [109-М], [110-М], [113-М], [114-М].

Тавсияҳо **оид ба истифодаи амалии натиҷаи таҳқиқот**

Тараққиёти саноати химия, ки коркарди ашёи хоми минералӣ ва истехсоли маводҳои навро талаб менамояд, ба омӯзиши системаҳои дахлдор алоқаманд мебошад. Системаи химиявии $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}, \text{CO}_3^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$ қисми таркибии системаи шашкомпонентаи мураккабтари $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}, \text{CO}_3^{2-}, \text{HCO}_3^-, \text{F}^- - \text{H}_2\text{O}$ мебошад, ки комплексҳои фазагии дар он ҷойдошта шароитҳои утилизатсияи партовҳои моеъи истехсоли алюминийро муайян мекунад. Партовҳои моеъи регенератсияи криолити заводи алюминий фторидҳо, карбонатҳо, гидрокарбонатҳо ва сульфатҳои натрий ва калсий доранд. Равандҳои кристаллизатсия ва ҳалшавандагии намакҳо дар маҳлулҳои обии ин партовҳо бо қонуниятҳои мувозинатҳои фазагӣ дар шакли системаи бисёркомпонента, системаҳои панҷ- ва чоркомпонентаи онро ташкилқунанда муайян карда мешаванд. Натиҷаҳои таҳқиқи политермаи ҳалшавандагӣ ва комплекси фазагӣ дар системаи бисёркомпонентаи обӣ-намакии муовизаи $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}, \text{CO}_3^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$ ва сохтори диаграммаи он имконият медиҳад, ки майдони кристаллизатсияи алоҳидаи 15 фаза, дар шароити додасуда фрагментатсия карда шуда, хосиятҳои топологии ифодаҳои геометрии хоси қисмҳои таркибии системаро ташкилқунанда муайян гардида, вобаста ба онҳо, зимни коркард дар майдонҳои сатҳи чоркомпонента як фаза ва дар сатҳи панҷкомпонента ду фаза чудо карда шавад. Консентратсияи мувозинатӣ дар фазаҳои моеъ зимни кристаллизатсияи алоҳида барои майдон ва кристаллизатсияи якҷоя барои хатҳо ва нуқтаҳо муқаррар карда шавад.

Дар асоси маълумот дар бораи сохтори изотермаҳои мувозинати фазаӣ ва роҳҳои кристаллизатсия дар таҳқиқоти системаҳои обӣ-намакӣ, инчунин маълумоти тавсифи ҷараёни риёзии раванд, усулҳои зерини оптимизатсияи ҷузъҳои технологияи коркарди маъдани полиминералӣ (партовҳои истехсоли) таҳия карда шудаанд: усулҳои ба даст овардани декагидрати карбонати натрий, нахколит ва виломит аз партовҳои моеъи истехсоли алюминий истифода бурдан мумкин аст.

ФЕҲРИСТИ ИНТИШОРОТИ ИЛМИИ ДОВТАЛАБИ ДАРЁФТИ ДАРАҶАИ ИЛМИЙ АЗ РЀИИ МАВЗУИ ДИССЕРТАТСИЯ

Монографияҳо:

[1-М]. Солиев, Л. Строение фазового комплекса и растворимость водно-солевой системы из сульфатов, карбонатов, гидрокарбонатов натрия и кальция / Л. Солиев, **М.Т. Жумаев**. Монография (Книга 1). -Душанбе: Балогат, -2020. -212 с. ISBN 978-99975-79-12-6.

[2-М]. Солиев, Л. Строение фазового комплекса и растворимость водно-солевой системы из сульфатов, карбонатов, гидрокарбонатов натрия и кальция / Л. Солиев, **М.Т. Жумаев**. Монография (Книга 2). --Душанбе: ТГПУ. -2023. -213 с. ISBN 978-99985-53-04-0.

[3-М]. Махмадов, Х.Р. Политерма фазового комплекса и растворимости системы Na, Ca // SO_4 , CO_3 - H_2O при $0 \div 100$ °C / Х.Р. Махмадов, **М.Т. Жумаев**, Л. Солиев. Монография. -Душанбе: Эр-Граф. -2025. -151 с. ISBN 978-99985-852-5-6.

Мақолаҳо дар маҷаллаҳои илмӣ тақризшавандаи тавсиянамудаи КОА ҚТ ва дигар маҷаллаҳои тахассусии илмӣ пойгоҳи байналхалқӣ:

[4-М]. Солиев, Л. Ҳалшавандагӣ дар системаи $\text{Na}_2\text{SO}_4\text{-K}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}$ дар ҳарорати 50 °C / Л. Солиев, Ш.Х. Авлоев, **М.Т. Жумаев** // Паёми донишгоҳи омӯзгорӣ. Бахши илмҳои табиӣ. -2009. -№ 2(34). -С.155-157.

[5-М]. Солиев, Л. Фазовые равновесия системы Na, Ca // SO_4 , HCO_3 - H_2O при 25 °C / Л. Солиев, **М.Т. Жумаев**, Ш.Х. Авлоев, В. Нури // Вестник Таджикского национального университета. Серия естественных наук -2012. -№ 1/3 (85). -С. 202-205.

[6-М]. Солиев, Л. Фазовые равновесия системы Na, Ca // CO_3 - HCO_3 - H_2O при 25 °C / Л. Солиев, **М.Т. Жумаев**, Г. Икбол, И.М. Низомов // ДАН Республики Таджикистан. -2012. -Т.55. -№ 3. -С. 220-224.

[7-М]. Солиев, Л. Фазовые равновесия системы Na, Ca // CO_3 , HCO_3 - H_2O при 0 °C / Л. Солиев, **М.Т. Жумаев**, Ш.Х. Авлоев, Г. Икбол // Вестник Таджикского национального университета. Серия естественных наук. -2013. -№ 1/1 (102). -С. 151-154.

[8-М]. Солиев, Л. Определение фазовых равновесий системы Na, Ca // HCO_3 , CO_3 - H_2O при 0 и 25 °C / Л. Солиев, **М.Т. Жумаев**, Ш.Х. Авлоев, Г. Икбол. Вестник педагогического университета. Серия естественных наук. -2013. -№ 3 (52). -С. 60-64.

[9-М]. Солиев, Л. Фазовые равновесия системы $\text{CaSO}_4\text{-CaCO}_3\text{-Ca(HCO}_3)_2\text{-H}_2\text{O}$ при 25 °C / Л. Солиев, **М.Т. Жумаев**, Ш.Х. Авлоев // Вестник Таджикского национального университета. Серия естественных наук. -2013. -№1/2 (106). -С. 178-181.

[10-М]. Солиев, Л. Фазовые равновесия системы Na, Ca // SO_4 , CO_3 - H_2O при 50 °C / Л.Солиев, **М.Т. Жумаев**, М.Б. Усмонов // Вестник национального университета. Серия естественных наук. -2014. -№ ¼ (153). -С. 190-195.

[11-М]. Солиев, Л. Строение диаграмм фазовых равновесий четырёхкомпонентных взаимных систем, составляющих шестикомпонентную систему Na, Ca // SO_4 , CO_3 , HCO_3 , F - H_2O при 25 °C / Л. Солиев, **М.Т. Жумаев**, М.Б. Усмонов, В. Нури, И. Гулом // Вестник национального университета. Серия естественных наук. - 2014. -№ ¼ (153). -С. 195-199.

[12-М]. Солиев, Л. Фазовые равновесия системы $\text{CaSO}_4\text{-CaCO}_3\text{-Ca(HCO}_3)_2\text{-H}_2\text{O}$ при 0 °C / Л. Солиев, **М.Т. Жумаев**, Ш.Х. Авлоев // ДАН Республики Таджикистан. - 2014. -Т.57. -№ 8. -С. 671-675.

[13-М]. Солиев, Л. Фазовые равновесия системы Na, K // SO_4 , CO_3 , HCO_3 , F- H_2O при 0 °C в области кристаллизации виломита / Л. Солиев, И.М. Низомов, **М.Т. Жумаев**, Гулом И. // Вестник национального университета. Серия естественных наук. -2015. - №1/1(156). -С. 132-136.

[14-М]. Солиев, Л. Растворимость системы $\text{CaSO}_4\text{-CaCO}_3\text{-Ca(HCO}_3)_2\text{-H}_2\text{O}$ при 0 °C / Л. Солиев, **М.Т. Жумаев**, Ш.Х. Авлоев // ДАН Республики Таджикистан. -2015. - Т.58. -№2. -С. 139-144.

- [15-М]. Солиев, Л. Фазовые равновесия системы Na, Ca // CO₃, HCO₃, F - H₂O при 0 °C / Л. Солиев, **М.Т. Жумаев**, И.М. Низомов, И. Гулом // Вестник национального университета. Серия естественных наук. -2015. -№1/1(156). -С. 136-142.
- [16-М]. Солиев, Л. Растворимость системы CaSO₄-CaCO₃-Ca(HCO₃)₂-H₂O при 25 °C / Л. Солиев, **М.Т. Жумаев**, Ш.Х. Авлоев // Вестник национального университета. Серия естественных наук. -2015. -№1/6 (19). -С. 110-116.
- [17-М]. Солиев, Л. Растворимость в системе Na, Ca //SO₄, CO₃-H₂O при 25 °C / Л. Солиев, **М.Т. Жумаев**, М.Б. Усмонов, И.М. Низомов // Журнал неорганической химии РАН. -2016. -Т 61. -№ 5. -С. 683-688.
- [18-М]. Soliev, L. Solubility in the Na, Ca // SO₄, CO₃ - H₂O system at 25 °C / L. Soliev, **М.Т. Jumaev**, M.B. Usmonov, I.M. Nizomov // Russian Journal at Inorganic Chemistry. - 2016. -Vol. 61. -№ 5. -PP. 651-655.
- [19-М]. Солиев, Л. Диаграммы фазовых равновесий четырёхкомпонентных взаимных систем, составляющих шестикомпонентную систему Na, Ca // SO₄, CO₃, HCO₃, F-H₂O при 25 °C / Л. Солиев, **М.Т. Жумаев**, М. Усмонов, В. Нури, И. Гулом // Вестник Таджикского национального университета. Серия естественных наук. -2016. -№ 1/4(2016). -С. 213-216.
- [20-М]. Солиев, Л. Растворимость в системе Na, Ca // SO₄, CO₃ - H₂O при 0 °C / Л. Солиев, **М.Т. Жумаев**, М.Б. Усмонов // Журнал неорганической химии РАН. -2016. -Т. 61. -№ 8. -С. 1093-1099.
- [21-М]. Soliev, L. Solubility in the Na, Ca // SO₄, CO₃ - H₂O system at 0 °C / L. Soliev, **М.Т. Jumaev**, M. Usmonov // Russian Journal at Inorganic Chemistry. -2016. -Vol.61. -№ 8. -PP. 1041-1046.
- [22-М]. Soliev, L. Structure of solubility diagram of the quaternary Na, Ca // SO₄, CO₃ - H₂O water-salt system at 25 °C / L. Soliev, **М.Т. Jumaev**, Sh. Tursunbadalov, M. Usmonov, Sh. Avloev // Austrian journal of Technical and Natural Sciences. -2016. -№ 9-10. -PP. 83-90.
- [23-М]. Солиев, Л. Фазовые равновесия системы CaSO₄-CaCO₃-CaF₂-H₂O при 50 °C / Л. Солиев, **М.Т. Жумаев**, М. Усмонов, П. Мухторов // Международный научный журнал «Символ науки». -2017. -№ 10. -С. 9-12.
- [24-М]. Солиев, Л. Растворимость системы Na₂SO₄-Na₂CO₃-NaHCO₃-H₂O при 50 °C / Л. Солиев, **М.Т. Жумаев**, Р.О. Тураев, Х.Р. Махмадов // Химический журнал Казахстана. -2017. -№ 4 (60). -С. 29-35.
- [25-М]. Солиев, Л. Растворимость в системе Na, Ca // CO₃, HCO₃ - H₂O при 25 °C / Л. Солиев, **М.Т. Жумаев**, И. Гулом, Б.Б.Джабборов // Журнал неорганической химии РАН. -2017. -Т. 62. -№ 9. -С. 1254-1259.
- [26-М]. Soliev, L. Solubility in the Na, Ca // CO₃, HCO₃ - H₂O system at 25 °C / L. Soliev, **М.Т. Jumaev**, I. Gulom, B. Dzhabborov // Russian Journal at Inorganic Chemistry. - 2017. -Vol.62. -№ 9. -PP. 1245-1251.
- [27-М]. Солиев, Л. Растворимость системы Na₂SO₄-Na₂CO₃- NaHCO₃-H₂O при 0 °C / Л. Солиев, **М.Т. Жумаев**, Р.О. Тураев // ДАН Республики Таджикистан. -2017. -Т.60. -№ 9. -С. 430-435.
- [28-М]. Soliev, L. Solubility and phase equilibria in the Na, Ca // CO₃, HCO₃ - H₂O system at 0 °C / L. Soliev, **М.Т. Jumaev**, B. Dzhabborov // Chimica Techno Acta. -2017. -Vol.4. -№ 3. -PP. 191-201.
- [29-М]. Солиев, Л. Фазовые равновесия в системе Na, Ca // SO₄, Cl - H₂O при 25 °C / Л. Солиев, **М.Т. Жумаев**, А. Тошов, А. Холмуродов // Вестник Таджикского национального университета. Серия естественных наук. -2017. -№ 1/3. -С. 218-221.
- [30-М]. Солиев, Л. Растворимости системы K₂SO₄-K₂CO₃-KHCO₃-H₂O при 0 °C / Л. Солиев, **М.Т. Жумаев**, Б.М. Иброгимова // Химический журнал Казахстана. -2018. -№3(63). -С. 107-113.
- [31-М]. Soliev, L. Structure of the solubility diagram in the Na₂SO₄-Na₂CO₃-NaHCO₃-H₂O system at 0, 25 and 50 °C / L. Soliev, **М.Т. Jumaev**, H.R. Makhmadov, B.B. Dzabborov // Chimica Techno Acta. -2018. -Vol. 5. -№ 2. -PP. 104-108.

- [32-M]. Soliev, L. Solubility in the Quaternary $\text{CaSO}_4\text{-CaCO}_3\text{-CaF}_2\text{-H}_2\text{O}$ System at 50 °C / L. Soliev, **М.Т. Жумаев**, P. Mukhtorov, Sh. Tursunbadalov, M. Usmonov // Inorganic Chemistry – An Indian Journal. -2018. -Vol. 13. -№ 1. -PP. 124-128.
- [33-M]. Солиев, Л. Растворимость в системе $\text{Na, Ca} \parallel \text{SO}_4, \text{HCO}_3 - \text{H}_2\text{O}$ при 0 °C / Л. Солиев, **М.Т. Жумаев**, А. Варкаева, Д. Музафарова // Доклады Академии наук Республики Таджикистан, -2018. -Т. 61. -№ 11-12. -С. 862-868.
- [34-M]. Soliev, L. Phase equilibrium of $\text{Na, Ca} \parallel \text{SO}_4, \text{HCO}_3 - \text{H}_2\text{O}$ systems at 0 °C / L. Soliev, **М.Т. Жумаев**, B.B. Jabborov, R.O. Turaev // East European Science Journal. -2018. Vol. 33. -№5-2. PP. 55-57.
- [35-M]. Soliev, L. Phase equilibrium of $\text{Na, Ca} \parallel \text{SO}_4, \text{CO}_3, \text{HCO}_3 - \text{H}_2\text{O}$ systems at 50 °C / L. Soliev, **М.Т. Жумаев** // Applied Solid State Chemistry. -2018. -№ 4(5). -PP. 192-198.
- [36-M]. Soliev, L. Phase equilibria in the System $\text{Na, Ca} \parallel \text{SO}_4, \text{CO}_3, \text{HCO}_3 - \text{H}_2\text{O}$ at 0 °C / L. Soliev, **М.Т. Жумаев** // Chimica Techno Acta. -2019. -Vol.6. -№1. -PP. 24-30.
- [37-M]. Солиев, Л. Растворимость в системе $\text{Na, Ca} \parallel \text{SO}_4, \text{F} - \text{H}_2\text{O}$ при 50 °C / Л. Солиев, **М.Т. Жумаев**, М.Б. Усмонов, П.А. Мухторов // Узбекский химический журнал. -2019. -№5. -С. 15-21.
- [38-M]. Soliev, L. Solubility in the system $\text{Na, Ca} \parallel \text{SO}_4, \text{CO}_3 - \text{H}_2\text{O}$ at 50 °C / L. Soliev, **М.Т. Жумаев**, H.R. Makhmadov // Russian Journal of Inorganic Chemistry. -2019. -Vol.64. -№ 2. -PP. 270-276.
- [39-M]. Солиев, Л. Растворимость в системе $\text{K}_2\text{SO}_4\text{-K}_2\text{CO}_3\text{-KHCO}_3\text{-H}_2\text{O}$ при 25 °C / Л. Солиев, **М.Т. Жумаев**, Б.М. Иброгимова // Политехнический вестник. Серия инженерные исследования. -2019. -№1(45). -С. 121-126.
- [40-M]. Soliev, L. Comparative analysis of phase complex systems $\text{Na, Ca} \parallel \text{SO}_4, \text{CO}_3 - \text{H}_2\text{O}$ about 50 and 75 °C / L. Soliev, **М.Т. Жумаев**, Kh.R. Makhmadov, D. Muzafarova // American Scientific Journal. -2019. -Vol, 28. -№ 2. -PP. 49-55.
- [41-M]. Солиев, Л. 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 ҳарорати 75 ва 100 °C / Л. Солиев, **М.Т. Жумаев**, Р.О. Тураев, Ҳ.Р. Махмадов, Н.В. Олимҷонова // Паёми донишгоҳи милли Тоҷикистон. Бахши илмҳои табиӣ. -2019. -№2. -С. 179-184.
- [42-M]. Soliev, L. Solubility in the $\text{Na, Ca} \parallel \text{SO}_4, \text{HCO}_3 - \text{H}_2\text{O}$ system at 25 °C / L. Soliev, **М.Т. Жумаев**, M. Varkaeва, H.R. Makhmadov // Chimica Techno Acta. -2019. -Vol.6. -№ 4. -PP. 130-137.
- [43-M]. Солиев, Л. Фазовый комплекс системы $\text{Na, Ca} \parallel \text{SO}_4, \text{CO}_3, \text{HCO}_3 - \text{H}_2\text{O}$ при 25 °C / Л. Солиев, **М.Т. Жумаев** // Химический журнал Казахстана. -2020. -№1(69). -С. 72-82.
- [44-M]. Солиев, Л. Фазовый комплекс системы $\text{Na, Ca} \parallel \text{SO}_4, \text{CO}_3, \text{HCO}_3 - \text{H}_2\text{O}$ при 75 °C / Л. Солиев, **М.Т. Жумаев**, И.М. Низомов // Узбекский химический журнал. -2020. -№ 5. -С. 16-24.
- [45-M]. Soliev, L. Phase complex of the system $\text{Na, Ca} \parallel \text{SO}_4, \text{CO}_3, \text{HCO}_3\text{-H}_2\text{O}$ at 100 °C / L. Soliev, **М.Т. Жумаев** // Chimica Techno Acta. -2020. -Vol.7. -№2. -PP. 71-80.
- [46-M]. Солиев, Л. Фазовый комплекс системы $\text{Na, Mg, Ca} \parallel \text{SO}_4, \text{CO}_3 - \text{H}_2\text{O}$ при 0 °C / Л. Солиев, **М.Т. Жумаев**, Б. Джабборзода // Химический журнал Казахстана. -2020. -№ 4(72). -С. 97-104.
- [47-M]. Солиев, Л. Строение фазового комплекса системы $\text{Na}_2\text{SO}_4\text{-K}_2\text{SO}_4\text{-MgSO}_4\text{-CaSO}_4\text{-H}_2\text{O}$ при 0 °C / Л. Солиев, **М.Т. Жумаев** // ДАН Республики Таджикистан. -2020. -Т. 63. -№1-2. -С. 89-97.
- [48-M]. Солиев, Л. Диаграмма фазовый комплекс системы $\text{Na, Ca} \parallel \text{SO}_4, \text{CO}_3, \text{HCO}_3 - \text{H}_2\text{O}$ при 50 °C / Л. Солиев, **М.Т. Жумаев** // Известия НАН Республики Таджикистан. -2020. -№ 3(180). -С. 104-113.
- [49-M]. Солиев, Л. Фазовый комплекс взаимной системы $\text{Na, Ca} \parallel \text{SO}_4, \text{CO}_3 - \text{H}_2\text{O}$ при 75 и 100 °C / Л. Солиев, **М.Т. Жумаев**, Х.Р. Махмадов, Д.З. Музафарова // ДАН Республики Таджикистан. -2020. -Т.63. -№ 9-10. -С. 618-625.

- [50-М]. Солиев, Л. Мувозинатҳои фазагии системаи K_2SO_4 - K_2CO_3 - $KHCO_3$ - KF - H_2O дар ҳарорати 0 °C / Л. Солиев, **М.Т. Б.М. Ибрагимова, Жумаев, И.М. Низомов** // Паёми донишгоҳи миллии Тоҷикистон. Бахши илмҳои табиӣ. -2020. -№ 4. -С. 277-285.
- [51-М]. Солиев, Л. Строение фазового комплекса системы $K, Mg, Ca \parallel SO_4, Cl - H_2O$ при 0 °C / Л. Солиев, **М.Т. Жумаев, И.О. Фрицкий** // Химический журнал Казахстана. -2021. -№ 1(73). -С. 142-150.
- [52-М]. Солиев, Л. Растворимость системы Na_2SO_4 - Na_2CO_3 - $NaHCO_3$ - H_2O при 75 °C / Л. Солиев, **М.Т. Жумаев, Р.О. Тураев** // Известия НАН Республики Таджикистан. - 2021. -№ 1(182). -С. 82-89.
- [53-М]. Солиев, Л. Сохтори диаграммаи мувозинатҳои фазагии системаи $Na, Ca \parallel SO_4, CO_3, HCO_3 - H_2O$ дар ҳарорати 100 °C / Л. Солиев, **М.Т. Жумаев** // Паёми политехникӣ. Бахши таҳқиқотҳои муҳандисӣ. -2021. -№ 2(54). -С. 49-56.
- [54-М]. Солиев, Л. Таҳлили муқоисавии диаграммаи ҳалшавандагии системаи $Na, Ca \parallel SO_4, CO_3 - H_2O$ дар ҳароратҳои 0, 25 ва 50 °C / Л. Солиев, **М.Т. Жумаев, Ҳ.Р. Махмадов, Д.З. Музаффарова**. Паёми донишгоҳи омӯзгорӣ. Бахши илмҳои табиӣ). - 2021. -№ 1 (10-11). -С. 253-257.
- [55-М]. Солиев, Л. Строение фазового комплекса системы $Na, K, Mg, Ca \parallel SO_4, Cl - H_2O$ при 0 °C в области кристаллизации мирабилита ($Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$) / Л. Солиев, **М.Т. Жумаев** // Вестник педагогического университета. Серия естественных наук. -2021. -№ 1 (10-11). -С. 51-61.
- [56-М]. Солиев, Л. Дивариантние равновесия в многокомпонентных системах / Л. Солиев, **М.Т. Жумаев** // Химический журнал Казахстана. -2021. -№ 4(76). -С. 59-71.
- [57-М]. Солиев, Л. Прогнозирование фазового комплекса системы $Na, Mg, Ca \parallel SO_4, CO_3 - H_2O$ при 0 °C / Л. Солиев, **М.Т. Жумаев, Б. Джабборзода** // Вестник педагогического университета. Серия естественных наук. -2021. -№ 1(10-11). -С. 242-247.
- [58-М]. Солиев, Л. Фазовый комплекс системы Na_2SO_4 - $CaSO_4$ - $Al_2(SO_4)_3$ - H_2O при изотерме 298 К / Л. Солиев, **М.Т. Жумаев, Д.З. Музаффарова** // Политехнический вестник. Серия инженерная исследования. -2021. -№ 3(55). -С. 45-49.
- [59-М]. Солиев, Л. Растворимость в системе K_2SO_4 - $KHCO_3$ - KF - H_2O при 0 °C / Л. Солиев, **М.Т. Жумаев, Б.М. Ибрагимова**. Доклады НАН Таджикистана. -2022. -Т. 65. - № 5-6. -С. 366-372.
- [60-М]. Солиев, Л. Комплексы фазагии системаи K_2SO_4 - K_2CO_3 - $KHCO_3$ - KF - H_2O дар ҳарорати 25 °C / Л. Солиев, **М.Т. Жумаев, Б.М. Ибрагимова** // Паёми донишгоҳи омӯзгорӣ. Бахши илмҳои табиатшиносӣ. -2021. -№ 1(10-11). -С. 247-253.
- [61-М]. Soliev, L. Formation of invariant equilibrium in multicomponent systems and determination of solid phase crystallization pathway / L. Soliev, **М.Т. Jumaev, I.M. Nizomov, Kh.R. Makhmadov, N.V. Olimjonova, D.V. Muzafarova** // Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. -2022. -PP.35-43.
- [62-М]. Солиев, Л. Изотерма растворимости системы $Na, Ca \parallel SO_4, CO_3 - H_2O$ при 50 °C / Л. Солиев, **М.Т. Жумаев, Ҳ.Р. Махмадов, Д. Музаффарова** // Вестник таджикского национального университета. Серия естественных наук. -2022. -№ 3. -С. 123-130.
- [63-М]. Солиев, Л. Строение фазового комплекса системы KCl - $MgCl_2$ - $CaCl_2$ - H_2O при 0 °C / Л. Солиев, **М.Т. Жумаев** // Вестник технологического университета. -2022. -№ 2(49). -С. 30-35.
- [64-М]. Солиев, Л. Фазовый комплекс системы Na_2SO_4 - $CaSO_4$ - $Al_2(SO_4)_3$ - H_2O при 25 °C / Л. Солиев, **М.Т. Жумаев, Д. Музаффарова** // Известия НАН Таджикистана. -2023. - № 1(190). -С. 40-46.
- [65-М]. Музаффарова, Д.З. Фазообразование в системе $Na, Ca, Al \parallel SO_4, CO_3 - H_2O$ при 273 К / Д.З. Музаффарова, **М.Т. Жумаев, Л. Солиев** // Доклады НАН Таджикистана. - 2023. -Т. 66. -№ 3-4. -С. 223-230.
- [66-М]. Олимҷонова, Н.В. Фазообразование в системе $Na, Ca, Al \parallel SO_4, HCO_3 - H_2O$ при 298 К / Н.В. Олимҷонова, **М.Т. Жумаев, Л. Солиев** // Известия НАН Таджикистана. -2023. -№ 2(191). -С. 223-230.

[67-М]. Олимджонова, Н.В. Сравнение фазовых равновесий в системе $\text{Na}_2\text{SO}_4\text{-CaSO}_4\text{-Al}_2(\text{SO}_4)_3\text{-H}_2\text{O}$ при температурах 273 и 298 К / Н.В. Олимджонова, Д.З. Музафарова, **М.Т. Жумаев**, Л. Солиев // Вестник филиала московского государственного университета им. М.В.Ломоносова в городе Душанбе. Серия естественных наук. -2023. -Т.1. -№3(33). -С. 53-61.

[68-М]. 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. -2024. -№ 1(65). -С. 108-111.

[69-М]. Olimjonova, N.V. Phase formation in the system Na , Ca , Al // SO_4 , HCO_3^- – H_2O at 273 K / N.V. Olimjonova, D.Z. Muzafarova, **М.Т. Jumaev**, Kh.R. Makhmadov, S. Sherzodi, I.M. Nizomov / Open Journal Systems (OJS). E3S Web of Conferences 592, 03020 (2024). EMMFT-2024.

[70-М]. **Жумаев, М.Т.** Фазаҳосилшавӣ дар системаи Na^+ , Ca^{2+} // CO_3^{2-} , HCO_3^- – H_2O барои 348 К / **М.Т. Жумаев**, Л. Солиев // Паёми донишгоҳи омӯзгорӣ. Бахши илмҳои табиӣ. -2024. -№1(21). -С. 42-48.

[71-М]. **Жумаев, М.Т.** Строение фазового комплекса системы $\text{Na}_2\text{SO}_4\text{-K}_2\text{SO}_4\text{-MgSO}_4\text{-CaSO}_4\text{-H}_2\text{O}$ при 0 °С / **М.Т. Жумаев**, Дж.М. Мусоджонзода, Л. Солиев // -2024. - Доклады НАН Республики Таджикистан. -2024. -Т.67. -№3-4. -С. 204-210.

[72-М]. **Жумаев, М.Т.** Параметрҳои концентратсионии ҳосилшавии фазаҳои сахти мувозинатии системаи $\text{Ca}^{2+}\text{-SO}_4^{2-}\text{-CO}_3^{2-}\text{-2HCO}_3^-\text{-H}_2\text{O}$ дар ҳарорати 75 °С / **М.Т. Жумаев**, Ҷ.М. Мусочонзода, Л. Солиев // Паёми донишгоҳи технологии Тоҷикистон. -2024. -№2(57). -С.22-29.

[73-М]. Низомов, И.М. Фазовые равновесия системы Na , K // SO_4 , CO_3 , HCO_3 , F – H_2O в области кристаллизации виломита / И.М. Низомов, **М.Т. Жумаев**, Л. Солиев // Вестник педагогического университета. Серия естественных наук. -2024. -№ 2-3 (22-23). -С.72-78.

[74-М]. **Жумаев, М.Т.** Сравнение растворимости в системе Na , Ca // SO_4 , HCO_3^- – H_2O при 273 и 298 К / **М.Т. Жумаев**, Н.В. Олимджонова, Д.З. Музафарова, Л. Солиев // Известия НАН Республики Таджикистан. -2024, -№4(197). –С. 85-92.

[75-М]. **Жумаев, М.Т.** Фазовый комплекс системы $\text{CaCO}_3\text{-CaF}_2\text{-Al}_4\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8\text{-TiO}_2$. / **М.Т. Жумаев**, А.Ш. Муродиён, Н.Х. Шарифов // Известия НАН Республики Таджикистан. -2025. -№2 (199). -С. 103-109.

[76-М]. **Жумаев, М.Т.** Таҳлили фазаҳои кристаллизатсионии системаи $\text{H}_2\text{O-2Na}^+\text{-Ca}^{2+}\text{-2Al-(SO}_4^{2-})_5$ барои 273 К / **М.Т. Жумаев**, Д.З. Музафарова, М. Раҳимова, Л. Солиев // Паёми донишгоҳи омӯзгорӣ. Бахши илмҳои табиӣ. -2025. -№4(28). -С. 143-151.

Нахустпатент ба ихтироот:

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

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

[79-М]. Малый патент № TJ 1649 РТ. Способ получения очищенного оксида кремния (кварца) и борной кислоты / Э.Дж. Маматова, С.Г. Назарзода, Х.Р. Махмадов, И.М. Низомова, **М.Т. Жумаева**; патентообладатель – Маматов Э.Дж. -№ 2502091. Дата подачи заявки 22.04.2025. Зарегистрировано 14.11.2025.

Фишурдаҳои мақолаҳо дар маводди конференсияҳои илмӣ:

[80-М]. **Жумаев, М.** Фазовые равновесия системы Na , Ca // SO_4 , CO_3 – H_2O при 0 °С / **М.Т. Жумаев**, Ш. Авлоев, Л. Солиев // Матер. Междунар. науч. теорет. конф, посвященная 60 – летию АН Респ. Таджикистан. -Душанбе. -2011. -С. 7-9.

[81-М]. Солиев, Л. Определение фазовых равновесий в системе Na, Ca // CO_3 , HCO_3 - H_2O / Л. Солиев, **М.Т. Жумаев**, И. Гулом, И. Низомов // Матер. Республ. конф. «Комплексообразование в растворах». —Душанбе. -2012. -С. 46-49.

[82-М]. Солиев, Л. Фазовые равновесия в невариантных точках системы Na, Ca // SO_4 , CO_3 , HCO_3 , F – H_2O при 25 °С на уровне четырёхкомпонентного состава / Л. Солиев, М. Усмонов, **М. Жумаев**, Н. Валентино, И. Гулом // Матер. III Междунар. конф. «Современные проблемы физической химии». -Донецк. -2013. -С. 199-200.

[83-М]. Солиев, Л. Строение диаграммы фазовых равновесий системы Na, Ca // SO_4 , HCO_3 - H_2O при 0 и 25 °С / Л. Солиев, **М.Т. Жумаев**, Ш.Х. Авлоев // Матер. Междунар. конф. «Экологически безопасные и ресурсосберегающие технологии и материалы». -Улан-Уде. -2014. -С. 226-228.

[84-М]. **Jumaev, M.T.** Phase balance in system Na, Ca // SO_4 , CO_3 , HCO_3 - H_2O at 0 °C / **M.T. Jumaev**, L. Soliev, Sh. Avloev // «European Science and Technology» Materials of the VII international research and practice conference. -Germany (Munich). -2014. -PP. 112-118.

[85-М]. Солиев, Л. Строение диаграмм фазовых равновесий четырёхкомпонентных систем с общим ионом, составляющих шестикомпонентную систему Na, Ca // SO_4 , CO_3 , HCO_3 , F - H_2O (изотерма 25 °С) / Л. Солиев, М. Усмонов, **М. Джумаев**, Н. Валентино, И. Гулом // Матер. Междунар. конф. «Теплофизические исследования и измерения при контроле качества веществ, материалов и изделий». —Душанбе-Тамбов. -2014. -С.390-393.

[86-М]. Солиев, Л. Равновесные твёрдые фазы четверных невариантных точек системы Na, Ca // SO_4 , CO_3 , HCO_3 , F - H_2O при 25 °С / Л. Солиев, М. Усмонов, **М. Джумаев**, С. Холмуродов, В. Нури, Г. Икбол // Матер. Всероссийской науч. конф. с международным участием «II Байкальский материаловедческий форум». -Улан-Уде. -2015. -С. 111-112.

[87-М]. **Jumaev, M.T.** Phase equilibriums of Na, Ca // SO_4 , CO_3 , HCO_3 - H_2O system at 25 degrees celsius / **M.T. Jumaev**, L. Soliev, Sh. Avloev // «Global Science and Innovation» Materials of the III international scientific conference. -USA (Chicago). -2014. -PP. 17-22.

[88-М]. Солиев, Л. Растворимости системы CaSO_4 - CaCO_3 - $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ - H_2O при 0 °С / Л. Солиев, **М.Т. Жумаев**, А.Ф. Тошов, З.П. Худоёрбекова // Сборник научных трудов по материалам VI Международной научно-практической конференции «Современные тенденции развития науки и технологий». -Белгород. -2015. -С. 28-31.

[89-М]. Солиев, Л. Растворимости системы CaSO_4 - CaCO_3 - $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ - H_2O при 25 °С / Л. Солиев, **М.Т. Жумаев**, З.П. Худоёрбекова // Сборник статей Международной научно-практической конференции «Научные исследования и разработки в эпоху глобализации», -Киров. -2016. -С. 26-30.

[90-М]. Солиев, Л. О фазовых равновесиях в системе Na, Ca // SO_4 , CO_3 - H_2O при 25 °С / И. Борисов, М. Шолидодов, **М. Джумаев**, А. Набиев // Материалы II Всероссийской молодежной конференции – школы с международным участием. «Достижения химии в агропромышленном комплексе». —Уфа. -2016. -С. 31-36.

[91-М]. Солиев, Л. Строение диаграммы растворимости системы Na, Ca // SO_4 , CO_3 - H_2O при 0 °С. / Л. Солиев, **М.Т. Жумаев**, М. Усмонов, И. Низомов // Материалы XI Международного Курнаковского совещания по физико-химическому анализу в рамках XX Менделеевского съезда по общей и прикладной химии. -Воронеж. -2016. -С. 217-221.

[92-М]. Солиев, Л. Изотермы растворимости и фазовых равновесий системы Na, Ca // SO_4 , CO_3 - H_2O при 0 и 25 °С. / Л. Солиев, **М.Т. Жумаев**, М. Усмонов, И. Низомов // Материалы Международной конференции «Термический анализ и калориметрии (RTAC)». -Санкт-Петербург. -2016. -С. 322-324.

[93-М]. Солиев, Л. Строение диаграммы фазовых равновесий в системе Na, Ca // CO_3 , HCO_3 - H_2O при 25 °С / Л. Солиев, **М.Т. Жумаев**, Б. Джабборов // Матер. III Всероссийской науч. конф. с международным участием «II Байкальский материаловедческий форум». -Улан-Уде. -2017. -С. 149-152.

[94-М]. Солиев, Л. Концентрационные параметры образования равновесных твёрдых фаз системы Na_2SO_4 - Na_2CO_3 - NaHCO_3 - H_2O при 50°С / Л. Солиев, **М.Т. Жумаев**, Р.О. Тураев, Х.Р. Махмадов // Материалы Всероссийской научной конференции с

международным участием «III Байкальский материаловедческий форум». -Улан-Уде. -2018. -С. 106-108.

[95-М]. Солиев, Л. Растворимость системы $\text{Na, Ca} \parallel \text{SO}_4, \text{CO}_3 - \text{H}_2\text{O}$ при 50°C / Л. Солиев, **М.Т. Жумаев**, Х.Р. Махмадов, М.Б. Усмонов // Сборник тезисов XXI Менделеевского съезда по общей и прикладной химии. -Санкт-Петербург. -2019. -Т.3. -С. 146.

[96-М]. Солиев, Л. Фазовые равновесия в четырёхкомпонентной системе $\text{Na, Ca} \parallel \text{SO}_4, \text{CO}_3 - \text{H}_2\text{O}$ при 75°C / Л. Солиев, **М.Т. Жумаев**, М.Б. Усмонов, Х.Р. Махмадов // Материалы IV-международной научной конференции «Вопросы физической и координационной химии». –Душанбе. -2019. -С. 359.

[97-М]. Солиев, Л. Фазовые равновесия системы $\text{Na, Ca} \parallel \text{SO}_4, \text{CO}_3 - \text{H}_2\text{O}$ при 0°C / Л.Солиев, **М.Т. Жумаев** // Материалы XV Нумоновского чтения «Современное состояние химической науки и использование её достижений в народном хозяйстве Республики Таджикистан». –Душанбе. -2019. -С. 18.

[98-М]. Солиев, Л. Фазовые равновесия системы $\text{Na, Mg} \parallel \text{SO}_4, \text{CO}_3 - \text{H}_2\text{O}$ при 25°C / Л. Солиев, **М.Т. Жумаев**, Б. Джабборзода // Сборник статей по итогам междунауч. практ. конф. –Стерлитамак. -2020. -С.118.

[99-М]. Солиев, Л. Строение фазового комплекса системы $\text{Na, K, Mg, Ca} \parallel \text{SO}_4, \text{Cl} - \text{H}_2\text{O}$ при 0°C в области кристаллизации мирабилита ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) / Л. Солиев, **М.Т. Жумаев** // Сборник статей Респуб. науч. прак. конф. «Современное состояние и перспективы физико-химического анализа». -Душанбе. -2021. -С. 51-61.

[100-М]. **Жумаев, М.Т.** Равновесные твёрдые фазы четверных невариантных точек системы $\text{Na, Ca} \parallel \text{SO}_4, \text{CO}_3, \text{HCO}_3 - \text{H}_2\text{O}$ при 0°C / **М.Т. Жумаев**, Л. Солиев, Х.Р. Махмадов, Н.В. Олимджонова // Всероссийский симпозиум и школа – конференция молодых ученых «Физико-химические методы в междисциплинарных экологических исследованиях». -Москва. -2021. -С. 262.

[101-М]. **Жумаев М.Т.** Определение фазовых равновесий в системе $\text{K}_2\text{SO}_4\text{-KHCO}_3\text{-KF-H}_2\text{O}$ при 0°C / **М.Т. Жумаев**, Л. Солиев, Б.М. Ибрагимова, Н.З.Ноибова // Матер. Междунауч. прак. конф. «Современные проблемы металлургической промышленности» -Душанбе. -2021. -С. 150.

[102-М]. **Жумаев М.Т.** Строение диаграммы фазовых равновесий в системе $\text{Na, Ca} \parallel \text{SO}_4, \text{CO}_3, \text{HCO}_3 - \text{H}_2\text{O}$ при $0, 25, 50^\circ\text{C}$ / М.Т. Жумаев, Х.Р. Махмадов, Л. Солиев // Материалы всероссийской научной конференции с международным участием IV-Байкальский материаловедческий форум. -Улан Уде. -2022. -С. 75-76.

[103-М]. Жумаев, М.Т. Строение диаграмм фазового комплекса системы $\text{Na, Ca} \parallel \text{SO}_4, \text{CO}_3, \text{HCO}_3 - \text{H}_2\text{O}$ при 100°C / **М.Т. Жумаев**, Л. Солиев // Материалы Республиканской конференции «Современное состояние и перспективы физико-химического анализа». -Душанбе. -2023. -С. 200-205.

[104-М]. **Жумаев, М.Т.** Прогнозирование строения диаграмм фазового комплекса многокомпонентных систем / **М.Т. Жумаев**, Н.В. Олимджонова, Х.Р. Махмадов // Всероссийской симпозиум и школа-конференция молодых учёных «Физико-химические методы в междисциплинарных исследованиях». -Севастополь. -2023. -С. 278-280.

[105-М]. **Жумаев, М.Т.** 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 / **М.Т. Жумаев**, Л. Солиев Л. // Материалы Междунауч. прак. конф. «Развитие новых направлений в химии и химической технологии». -Душанбе. -2023. -С. 151-153.

[106-М]. **Жумаев, М.Т.** Изотермы растворимости и фазовых равновесий системы $\text{CaSO}_4\text{-CaCO}_3\text{-Ca(HCO}_3)_2\text{-H}_2\text{O}$ при 50°C / **М.Т. Жумаев**, М. Рахимова, Л. Солиев // Сборник научных статей по итогам международной конференции «Химическая наука и образование, проблемы и перспективы развития». –Махачкала. -2024. -С.29-34.

[107-М]. **Жумаев, М.Т.** Сохтори диаграммаи системаи $3\text{Ca}^{2+}\text{-SO}_4^{2-}\text{-O}_3^{2-}\text{-2HCO}_3\text{-H}_2\text{O}$ дар харорати 75°C / **М.Т. Жумаев**, Л. Солиев // Маводи конференсияи байналмилалӣ илмӣ-амалӣ дар мавзуи «Нақши химия ва саноати химиявӣ дар саноатикунонии Тоҷикистон». –Душанбе. -2024. С. 64-69.

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

[109-М]. Жумаев, М.Т. Изучение растворимости системы Ca²⁺, Na⁺ || CO₃²⁻, SO₄²⁻ – H₂O при 75 °С / М.Т. Жумаев, Х.Р. Махмадов, Д.Музафарова, Л. Солиев // XXII Менделеевский съезд по общей и прикладной химии. Сборник тезисов. –Сириус. -2024. -Том 6. -С.36.

[110-М]. Олимджонова, Н.В. Растворимость системы Na, Ca || SO₄, CO₃ - H₂O при 273 и 298 К / Н.В.Олимджонова, Д.З. Музафарова, М.Т. Жумаев, Л. Солиев // Сборник материалов XIX Нумановского чтения на тему: «Развитие фундаментальной и прикладной химии и её вклад в индустриализацию страны». –Душанбе. -2024. -С.63-66.

[111-М]. Жумаев, М.Т. Исследование многокомпонентных систем: проблемы и пути их решения. / М.Т. Жумаев, Л. Солиев // Материалы науч. прак. конф. «Современное состояние и перспективы физико-химического анализа». -Душанбе. -2025. -С.41-50.

[112-М]. Олимджонова, Н.В. Сравнение фазообразований в системе Na, Al || SO₄, HCO₃ - H₂O при 273 и 298 К / Н.В. Олимджонова, М.Т. Жумаев, Л. Солиев // IX Междун. науч. прак. конф. «Булатовские чтения». –Красноярск. -2025. -С.173.

[113-М]. Жумаев, М.Т. Растворимость системы 3Ca²⁺–SO₄²⁻–O₃²⁻–2HCO₃⁻–H₂O при 75 °С / М.Т. Жумаев, Л.Солиев // Материалы Междун. науч. практ. конф. «Комплексные соединения и аспекты их применения». -Душанбе. -2025. -С. 17-20.

[114-М]. Жумаев М.Т. Анализ кристаллизующих фаз в многокомпонентной системе Na⁺, Ca²⁺ || SO₄²⁻, CO₃²⁻, HCO₃⁻ - H₂O при 75 °С / М.Т. Жумаев, Л. Солиев // Материалы Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы современной химии, решения и перспективы развития». 15.05.2025. Денав. -С. 82-84.

[115-М]. Жумаев, М.Т. Мувозинатҳои дивариантӣ дар системаи бисёркомпонентаи Na⁺, Ca²⁺ || SO₄²⁻, CO₃²⁻, HCO₃⁻ - H₂O / М.Т. Жумаев, Л. Солиев // Хонишҳои XX Нӯмоновӣ дар мавзӯи: «Марҳилаҳои муосири рушди илмҳои кимиёвӣ ва техники: масъалаҳои мубрами назария ва амалия». -Душанбе. -2025. -С. 70-74.

[116-М]. Жумаев, М.Т. Сохтори диаграммаи системаи CaCO₃–CaF₂–Al₄Si₄O₁₀(OH)₈–TiO₂ / М.Т. Жумаев, А.Ш. Муродиён, Л.Солиев // Маводи конференсияи байналхалқии илмӣ-назариявӣ «Марҳилаҳои ҳозираи инкишофи илмҳои табиатшиносӣ, дақиқ ва риёзӣ дар соҳаи илм ва маориф: масъалаҳои актуалӣ, назария ва амалия». -Душанбе. -2025. -С. 114-117.

[117-М]. Жумаев, М.Т. Уточнение фазовой диаграммы в многокомпонентной системе Na, Ca || SO₄, CO₃, HCO₃ - H₂O при 100 °С / М.Т. Жумаев, Л. Солиев // «V-Байкальском материаловедческом форуме». -Улан-Уде. -2025. -С. 78-79.

[118-М]. Жумаев, М.Т. Мувозинати нонвариантӣ дар системаи бисёркомпонентаи Na⁺, Ca²⁺ || SO₄²⁻, CO₃²⁻, HCO₃⁻ - H₂O / М.Т. Жумаев, Л. Солиев // Маводи конференсияи II-юми байналхалқии илмӣ-амалии «Масъалаҳои мубрами соҳаи металлургия дар шароити саноатикунони босуръати кишвар». –Душанбе. -2025. -С. 130-136.

**ТАДЖИКСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ПЕДАГОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ САДРИДДИНА АЙНИ**

На правах рукописи



УДК: 546.123.7+541.015.32.6

ББК: 24.1+24.5

Ж - 88

ЖУМАЕВ МАЪРУФЖОН ТАГОЙМУРOTOVИЧ

**ПОЛИТЕРМА ФАЗОВОГО КОМПЛЕКСА И РАСТВОРИМОСТЬ
ВОДНО-СОЛЕВОЙ СИСТЕМЫ ИЗ СУЛЬФАТОВ, КАРБОНАТОВ,
ГИДРОКАРБОНАТОВ НАТРИЯ И КАЛЬЦИЯ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора химических наук по специальностям:
1.4.2. Неорганическая химия и 1.4.5. Физическая химия

ДУШАНБЕ – 2026

Диссертация выполнена при кафедре общая и неорганическая химия
Таджикского государственного педагогического университета имени Садриддина
Айни

**Научные
консультанты:**

Солиев Лутфулло, Заслуженный деятель науки и
техники Таджикистана, доктор химических наук,
профессор, профессор кафедры общей и
неорганической химии Таджикского государственного
педагогического университета имени Садриддина
Айни;

Рахимова Мубаширхон, доктор химических наук,
профессор, профессор кафедры физической и
коллоидной химии Таджикского национального
университета.

**Официальные
оппоненты:**

Бадалов Абдулхайр, доктор химических наук,
профессор, член-корреспондент НАНТ, профессор
кафедры общей и неорганической химии Таджикского
технического университета имени академика
М.С. Осими;

Абулхаев Владимир Джалолович, доктор
химических наук, профессор, заведующий
лабораторией химии гетероциклических соединений
Института химии имени В.И. Никитина НАНТ;

Мирзозода Баходур, доктор технических наук,
профессор, старший научный сотрудник отдела науки,
инновации, международных отношений и журнальной
публикации филиала Московского государственного
университета имени М.В. Ломоносова в городе
Душанбе.

Ведущая организация:

Российско-Таджикский (Славянский) университет

Защита состоится «___» _____ 2026 года, в 13⁰⁰ часов на заседании
диссертационного совета 6D.KOA-010 при Таджикском национальном
университете.

Адрес: 734025, г.Душанбе, проспект Рудаки, 17 Таджикский национальный
университет, главное здание, зал диссертационного совета, второй этаж,
E-mail: nazira64@indox.ru, **тел.:** (+992) 935476644, **факс:** (992-372) 217711.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке и на сайте
Таджикского национального университета www.tnu.tj

Автореферат разослан «___» _____ 2026 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
к.х.н., дотцент



Бекназарова Н. С.

Введение

Актуальность темы исследования. Общеизвестными являются фундаментальные достижения физико-химического анализа в сфере неорганической и физической химии, в частности, при исследовании металлических, оксидных и солевых систем. Тем не менее, преимущественное большинство научных работ фокусируются на системах, включающих не более четырёх компонентов. Данное ограничение преимущественно обусловлено методологическими сложностями, связанными с геометрическим представлением результатов, построением диаграмм фазовых равновесий (ДФР) и достоверным определением состава равновесных твёрдых фаз в многокомпонентных системах (МКС).

Значимость основ физико-химического анализа МКС возрастает в контексте решения актуальных проблем переработки полиминерального природного и техногенного сырья. Ключевой задачей физико-химического анализа является конструирование оптимальных технологических режимов для комплексной переработки природного сырья и промышленных отходов, включая жидкие химические соединения. Процессы гидрометаллургической и галургической переработок такого сырья регулируются закономерностями фазовых равновесий (ФР), специфичными для пятикомпонентной водно-солевой системы, содержащей сульфаты, карбонаты, гидрокарбонаты натрия и кальция, а также её многочисленных подсистем.

Одним из ключевых промышленных объектов на территории Республики Таджикистан является завод «Алюминий Точик». Образующиеся в результате его деятельности техногенные отходы занимают значительные площади и оказывают негативное воздействие на окружающую среду. При этом, химический состав указанных отходов характеризуется присутствием ценных компонентов: фторидов, сульфатов, карбонатов, гидрокарбонатов натрия, калия, кальция и алюминия. Систематическое изучение закономерностей фазовых комплексов данных систем потенциально открывает возможности для их эффективной вторичной переработки.

В связи с этим, определение политермы фазового комплекса в многокомпонентной системе Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, CO_3^{2-} , HCO_3^- - H_2O в температурном интервале $^{\circ}\text{C}$ является необходимым условием для верификации оптимальных параметров рециклинга жидких промышленных стоков, в состав которых входят сульфаты, карбонаты и гидрокарбонаты натрия и кальция.

Степень научной разработанности проблемы. Фундаментальные основы физико-химического анализа (ФХА), в частности, методология анализа и исследования многообразных химических систем, были заложены и развиты плеядой выдающихся учёных, среди которых следует отметить: Н.С. Курнакова, В.Н. Лодочникова, В.П. Радищева, В.Я. Аносова, Д.С. Коржинского, Ф.М. Перельмана, В.А. Жарикова, В.И. Михееву, Я.Г. Горошенко, А.С. Трунина, Л.С. Солиева, А. Вахобова, Т.Дж. Джураева, И.Н. Ганиева и других исследователей.

Указанные учёные концентрировали свои научные изыскания преимущественно на изучении металлических, оксидных и солевых химических систем в зависимости от температуры плавления. Изучение изотермических фазовых равновесий и растворимости в водно-солевых химических системах осуществлялось Я.Г. Горошенко, Л.С. Солиевым, И.К. Минковым, Р.М. Чихом, Б.И. Лушенко, Я.А. Драном, Г.С. Гулевич, И.Д. Караванским, С.И. Пришляком, А.Б. Мазуркевичем. В данном направлении были систематически исследованы фазовые равновесия и растворимость в многокомпонентной водно-солевой системе Na , K , Mg , $\text{Ca} \parallel \text{SO}_4$, $\text{Cl-H}_2\text{O}$ («морской системе»). Работы охватывали температурный интервал $0 \div 100^{\circ}\text{C}$ на уровне пяти компонентов, а также определены границы полей кристаллизации для отдельных фаз на уровне шести компонентов. В результате были построены фазовые диаграммы исследуемой системы и её составляющих подсистем, а также осуществлена фрагментация (сегментация) отдельных фаз. Однако, анализ доступной научной литературы показал, что политерма пятикомпонентной системы Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, CO_3^{2-} , HCO_3^- - H_2O остаётся неизученной. В частности, отсутствуют построенные диаграммы фазового

комплекса, фазового состояния и их политермические представления. Растворимость отдельных субсистем, входящих в состав данной МКС, хотя и была частично исследована, но полные диаграммы растворимости для них не построены.

Связь исследования с программами (проектами) и научными тематиками. Представленное диссертационное исследование решает задачи, коррелирующие с четвёртой стратегической национальной целью развития химической промышленности, а также с программами по изучению, переработке местного сырья и промышленных отходов. В рамках выполнения вышеупомянутых программ, диссертационная работа проводилась в тесной взаимосвязи со следующими научно-исследовательскими темами (госзаказами): «Определение фазовых равновесий в многокомпонентной системе сульфатов, карбонатов, гидрокарбонатов, фторидов натрия и кальция» (2014-2019 гг., государственный регистрационный номер 0114TJ00343); «Растворимость и кристаллизация солей в многокомпонентной системе, образованной сульфатами, карбонатами, гидрокарбонатами, фторидами натрия, калия и кальция» (2019-2023 гг., государственный регистрационный номер 0119TJ00957); «Изотерма фазообразования и растворимости солей в многокомпонентной системе Na^+ , K^+ , $\text{Al}^{3+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, CO_3^{2-} , F^- - H_2O при 273 и 298 К» (2026-2030 гг., государственный регистрационный номер 0179TJ01057).

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Целью данного исследования является разработка и верификация усовершенствованного метода прогнозирования политермы фазового комплекса в многокомпонентной водно-солевой системе, включающей катионы натрия, кальция и анионы сульфата, карбоната и гидрокарбоната, также включает построение диаграмм фазового комплекса, систематическое изучение растворимости в невариантных точках и практическое применение полученных данных для решения прикладных технологических задач.

Задача исследования:

- модернизация методологического подхода к экспериментальному определению политермы фазового комплекса в многокомпонентных водно-солевых системах;
- совершенствование методов построения политермических диаграмм фазового комплекса и растворимости для исследуемой МКС;
- детальное исследование фазовых комплексов в многокомпонентной водно-солевой системе, образованной сульфатами, карбонатами и гидрокарбонатами натрия и кальция;
- использование установленных закономерностей фазовых комплексов для изучения траекторий кристаллизации технологических растворов, а также для разработки оптимальных технологических параметров галургической переработки полиминеральных руд и рециклинга жидких техногенных отходов алюминиевого производства;
- построение диаграмм состояния (диаграмм растворимости) для пятикомпонентной водно-солевой системы (катионы щёлочного металла натрия и щёлочноземельного металла кальция с соответствующими анионами) и для всех её составляющих подсистем на основе результатов экспериментального определения растворимости;
- построение по границам полей кристаллизации фрагментов диаграмм: в четырехкомпонентных системах дивариантных фаз, а также в пятикомпонентной системе моновариантных линий двух фаз, которые кристаллизуются совместно;
- разработка принципиальных технологических схем для селективного выделения индивидуальных твёрдых фаз на основе анализа диаграмм фазового комплекса и диаграмм состояния (растворимости) исследуемой химической многокомпонентной системы.

Объекты исследования. Объектами исследования являются многокомпонентная система Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, CO_3^{2-} , HCO_3^- - H_2O и её структурные четырехкомпонентные подсистемы: $\text{Na}^+ \parallel \text{SO}_4^{2-}$, CO_3^{2-} , HCO_3^- - H_2O ; $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, CO_3^{2-} , HCO_3^- - H_2O ; Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, CO_3^{2-} - H_2O ; Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, HCO_3^- - H_2O ; Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{CO}_3^{2-}$, HCO_3^- - H_2O , а также трёхкомпонентные подсистемы: $\text{Na}^+ \parallel \text{SO}_4^{2-}$, CO_3^{2-} - H_2O ; $\text{Na}^+ \parallel \text{SO}_4^{2-}$, HCO_3^- - H_2O ; $\text{Na}^+ \parallel$

CO_3^{2-} , HCO_3^- - H_2O ; $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, CO_3^{2-} - H_2O ; $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, HCO_3^- - H_2O ; $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{CO}_3^{2-}$, HCO_3^- - H_2O ; Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$ - H_2O ; Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{CO}_3^{2-}$ - H_2O ; Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{HCO}_3^-$ - H_2O .

Предмет исследования. Предметом исследования является политерма фазового комплекса и растворимость в водно-солевой системе, образованной сульфатами, карбонатами и гидрокарбонатами натрия и кальция.

Научная новизна:

- разработан и верифицирован усовершенствованный метод прогнозирования политермы фазовых комплексов в многокомпонентных системах (МКС), который базируется на трансляции структурных элементов из системы, содержащей n компонентов, в область общей системы с $(n + 1)$ компонентами;

- модернизировано построение диаграмм, усовершенствован подход к построению диаграмм фазовых комплексов МКС, который обеспечивает комплексное геометрическое отражение всех потенциально возможных фазовых комплексов и их взаимного расположения;

- осуществлено теоретическое и графическое моделирование фазовых равновесий с использованием разработанного и усовершенствованного метода прогнозирования политермы фазовых комплексов в многокомпонентных системах (МКС), теоретически идентифицированы все возможные фазовые равновесия в 20 изотермах четырёхкомпонентных систем и 5 изотермах пятикомпонентных систем сульфатов, карбонатов и гидрокарбонатов натрия и кальция. На основе этих данных построены полные изотермические диаграммы фазовых комплексов исследованных систем;

- выявлены структурные особенности диаграмм, установлены специфические структурные особенности диаграмм, исследуемых многокомпонентных водно-солевых систем, которые детерминируют условия практической реализации процессов фазообразования в них;

- изучены траектории кристаллизации в системе с анионами сульфатов, карбонатов, гидрокарбонатов и катионами натрия, кальция в области составов, сопоставимых с технологическими растворами. Выявлены закономерности кристаллизации и определена преимущественная растворимость натриево-кальциевых солей;

- осуществлена полная фрагментация построенных диаграмм по границам кристаллизации индивидуальных фаз для четырёхкомпонентных систем, а также совместная кристаллизации двух фаз для пятикомпонентной системы;

- осуществлена технологическая имплементация, на основе анализа диаграмм фазового комплекса и диаграмм состояния (растворимости) подсистем, разработаны принципиальные технологические схемы для селективного выделения индивидуальных твёрдых фаз. Предложены конкретные методы разделения отдельных фаз из состава жидких промышленных отходов.

Положения, выносимые на защиту:

- усовершенствованный метод прогнозирования политермы фазовых комплексов (ФК) в МКС, основанный на трансляции структурных элементов из системы, содержащей n компонентов, в область общей системы с $(n+1)$ компонентами за счёт концентрационного фактора на изотерме, учёте системных параметров при построении политермы;

- новый методологический подход к построению диаграмм фазовых комплексов МКС, который обеспечивает исчерпывающее геометрическое отображение всех потенциально возможных фазовых равновесий и их взаимного расположения в пространстве составов;

- результаты комплексного исследования и построения полных диаграмм ФК для всех возможных политерм фазовых равновесий в 20 изотермах четырёхкомпонентных систем и 5 изотермах пятикомпонентных систем, содержащих сульфаты, карбонаты и гидрокарбонаты натрия и кальция;

- идентификация структурных характеристик диаграмм многокомпонентных водно-солевых систем, которые детерминируют условия и ограничения практической реализации процессов фазообразования в данных системах;

- результаты исследования траекторий кристаллизации в системе с анионами сульфатов, карбонатов, гидрокарбонатов и катионами натрия и кальция в области составов, близких к технологическим. Установленные закономерности кристаллизации и правила преимущественной растворимости натриево-кальциевых солей;

- полная фрагментация построенных диаграмм на уровне четырёхкомпонентного состава по границам кристаллизации дивариантных полей индивидуальных фаз, по линиям моновариантной совместной кристаллизации двух фаз исследуемой системы пятикомпонентного состава;

- разработанная новая принципиальная технологическая схема селективного выделения индивидуальных твёрдых фаз, основанная на анализе диаграмм фазового комплекса и растворимости (диаграмм состояния) подсистем исследуемой многокомпонентной химической системы, а также предложения по способам разделения отдельных фаз из жидких промышленных отходов.

Теоретическая и научно-практическая значимость исследования:

- разработанный методологический подход прогнозирования фазовых комплексов в сложных многокомпонентных системах (СМС) позволяет существенно оптимизировать процесс экспериментального изучения сложных природных и технологических объектов;

- сформулированные методы конструирования диаграмм фазовых комплексов обеспечивают возможность детальной визуализации структуры СМС и дают основу для предиктивного моделирования потенциальных траекторий кристаллизации на всех уровнях вариантности (согласно правилу фаз Гиббса);

- установленные закономерности процессов кристаллизации и растворимости натрий-кальциевых солей позволяют управлять механизмами этих процессов при решении актуальных задач по целенаправленному выделению индивидуальных твердых фаз из водно-солевых многокомпонентных растворов;

- полученные в ходе исследования материалы могут быть интегрированы в учебные и специализированные курсы по физико-химическому анализу (ФХА) и гетерогенным равновесиям в научно-исследовательских учреждениях и высших учебных заведениях.

Представленные результаты проведенного исследования констатируют новое перспективное научное направление в области основ физико-химического анализа. Это направление базируется на прогнозировании фазообразования в СМС посредством трансляции геометрических форм строения парциальных систем на область общей системы, а также на построении диаграмм фазовых комплексов и растворимости в плоскости. Данный подход позволяет интенсифицировать процессы экспериментального изучения сложных природных и технических объектов и, опираясь на разработанные диаграммы, создавать новые технологические схемы переработки полиминерального сырья.

Степень достоверности результатов. Достоверность полученных научных результатов подтверждается и обосновывается применением современных инструментальных методов физико-химического анализа и методов статистической обработки экспериментальных данных с применением новейших компьютерных программ, успешной апробацией на международных и республиканских форумах, симпозиумах, конференциях, а также публикацией ключевых материалов в рецензируемых научных изданиях, включенных в перечень ВАК или соответствующих специализированных научных журналах.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности

Область выполненного исследования полностью соответствует паспортам научных специальностей Неорганическая химия и Физическая химия по ряду ключевых направлений.

1.4.2. Неорганическая химия. Пункт 1. Изучение характера взаимосвязи между составом, структурой и свойствами неорганических соединений (глава II диссертации). Пункт 2. Разработка методов исследования неорганических соединений (глава III данного исследования). Пункт 3. Синтез и исследование структуры и свойств материалов на основе неорганических соединений (глава V настоящей работы). Пункт 4. Изучение химических и

структурно-фазовых превращений неорганических соединений под воздействием различных факторов (глава IV диссертационной работы).

1.4.5. Физическая химия. Пункт 3. Теория растворов, межмолекулярные и межчастичные взаимодействия (главы II-V представленной диссертационной работы). Пункт 5. Исследование закономерностей процессов изменения структуры и состава химических систем в условиях внешних полей, температур и давлений, совместных физических и физико-химических воздействий (глава III проведенного исследования). Пункт 6. Физико-химические основы процессов химической технологии (глава V настоящей диссертации).

Личный вклад соискателя ученой степени в выполнение данного диссертационного исследования включает следующие ключевые этапы работы: формулирование цели и задач, систематический сбор, анализ и критическая обработка релевантных научных публикаций, методологическое обоснование и выбор оптимальных методов решения поставленных проблем, сборка и наладка экспериментального оборудования, личное проведение экспериментальных работ на всех этапах исследования, комплексная обработка и анализ экспериментальных данных, включая выполнение всех необходимых расчётов и формулирование научных выводов.

Апробация и реализация результатов диссертации. Основные и наиболее значимые результаты выполненного диссертационного исследования были представлены и обсуждены на следующих научных площадках: ежегодной научно-теоретической конференции профессорско-преподавательского состава ТГПУ им. С. Айни (Душанбе, 2010-2025); Международной конференции 60-лет Академии наук Таджикистана (Душанбе, 2011); Республиканской конференции «Комплексообразование в растворах» (Душанбе, 2012); VI Международной конференции «Современные проблемы физической химии» (Донецк, 2013); Международной конференции «Экологобезопасные и ресурсосберегающие технологии и материалы» (Улан-Уде, 2014); VII научно-практической конференции «European Science and Technology» (Мюнхен, Германия, 2014); Международной научной конференции «Теплофизические исследования и измерения при контроле качества веществ, материалов и изделий» (Душанбе-Тамбов, 2014); Международной конференции «Экологобезопасные и ресурсосберегающие технологии и материалы» (Улан-Уде, 2015); III Международной конференции «Global Science and Innovation» (Chicago, USA, 2014); VI научно-практической конференции «Современные тенденции развития науки и технологии» (Белгород, 2015); научно-практической конференции «Научные исследования и разработки в эпоху глобализации» (Киров, химии в агропромышленном комплексе» (Уфа, 2016); XI Курнаковские чтения по физико-химическому анализу как XX Менделеевский съезд по общей и прикладной химиям (Воронеж, 2016); II Байкальский материаловедческий форум (Улан-Уде, 2017); III Байкальский материаловедческий форум (Улан-Уде, 2018); XXI Менделеевском съезде по общей и прикладной химии (Санкт-Петербург, 2019); Международной научной конференции «Вопросы физической и координационной химии» (Душанбе, 2019); XV Нумановские чтения «Современное состояние химической науки и использование её достижений в народном хозяйстве Республики Таджикистан» (Душанбе, 2019); Международной научно-практической конференции «Фундаментальные и прикладные исследования в науке и образовании» (Стерлитамак, 2020); Республиканской научно-практической конференции «Современное состояние и перспективы физико-химического анализа» (Душанбе, 2021); Всероссийском симпозиуме молодых ученых с международным участием «Физико-химические методы в междисциплинарных экологических исследованиях» (Москва, 2021); Международной конференции «Современные проблемы металлургической промышленности» (Душанбе, 2021); IV Байкальском материаловедческом форуме (Улан Уде, 2022); Республиканской научно-практической конференции «Современное состояние и перспективы физико-химического анализа» (Душанбе, 2023); Всероссийском симпозиуме молодых ученых «Физико-химические методы в междисциплинарных исследованиях» (Севастополь, 2023);

Международной научно-практической конференции «Развитие новых направлений в химии и химической технологии» (Душанбе, 2023); Международной конференции «Химическая наука и образование, проблемы и перспективы развития» (Махачкала, 2024); научно-практическая конференция «Накши химия ва саноати химиявӣ дар саноатикунонии Тоҷикистон» (Душанбе, 2024); IV Международной конференции «Вопросы физической и координационной химии» (Душанбе, 2024); «XXII Менделеевский съезд по общей и прикладной химии» (Сириус, 2024); XIX Нумановских чтениях (Душанбе, 2024); Республиканской научно-практической конференции «Современное состояние и перспективы физико-химического анализа» (Душанбе, 2025); IX Булатовских чтениях (Красноярск, 2025); Международной конференции «Комплексные соединения и аспекты их применения» (Душанбе, 2025); Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы современной химии, решения и перспективы развития» (Денау, 2025); V Байкальском материаловедческом форуме (Улан-Уде, 2025); научно-практической конференции «Пайваستҳои комплексӣ ва ҷанбаҳои истифодабарии онҳо» (Душанбе, 2025) и XX Нумановских чтениях (Душанбе, 2025) обсуждены и прошли апробацию.

Публикации по теме диссертации. На основании результатов диссертационной работы опубликовано 118 научных материалов, в том числе: 3 монографии, 3 малых патента РТ, 73 статей в рецензируемых журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией (ВАК) при Президенте Республики Таджикистан, ВАК Российской Федерации и профилных международных, 39 тезисов докладов, представленных в материалах международных и республиканских конференций.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, 5 глав, выводов, рекомендаций и приложения. Общий объём составляет 364 страницы компьютерного текста. Содержит 123 рисунка и 91 таблицу.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Во введении обосновывается актуальность и необходимость проведения диссертационного исследования, определяются цель и задачи работы, а также отражаются её научно-теоретическая и практическая значимости.

Первая глава диссертационной работы посвящена краткому обзору литературы по теоретическим основам и методам исследования многокомпонентных взаимных солевых систем, включая: методологию матричного представления многокомпонентных солевых систем; методы триангуляции диаграмм многокомпонентных взаимных систем; конверсионный метод исследования многокомпонентных систем; определение фазовых комплексов химических систем с использованием метода трансляции. Исследование политермы фазового комплекса химических систем и анализ степени изученности политермы пятикомпонентной системы $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}, \text{CO}_3^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$.

Вторая глава диссертации представляет результаты исследования политермы фазового комплекса системы $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}, \text{CO}_3^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$ на уровне четырёхкомпонентного состава. В ней изучены трёхкомпонентные и четырёхкомпонентные подсистемы вышеуказанной системы и построены их диаграммы фазового комплекса.

Третья глава содержит результаты исследования политермы структуры фазового комплекса системы $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}, \text{CO}_3^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$ на уровне пятикомпонентного состава, включая фрагментацию полей кристаллизации индивидуальных твёрдых фаз.

В четвёртой главе представлены и проанализированы результаты исследования политермы растворимости пятикомпонентной системы $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}, \text{CO}_3^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$, её подсистем: $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}, \text{CO}_3^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$ и подсистемы $5\text{Na}^+ - \text{SO}_4^{2-} - \text{CO}_3^{2-} - \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$; $3\text{Ca}^{2+} - \text{SO}_4^{2-} - \text{CO}_3^{2-} - 2\text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$; $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}, \text{CO}_3^{2-} - \text{H}_2\text{O}$; $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$; $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+} \parallel \text{CO}_3^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$, являющихся её структурными элементами. Для каждой из этих систем построены диаграммы растворимости, определены геометрические координаты равновесных состояний.

Пятая глава диссертационного исследования носит прикладной характер. В ней представлены данные о концентрационных параметрах равновесных твёрдых фаз в системе

Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, CO_3^{2-} , HCO_3^- - H_2O , которые составляют основу для разработки методов переработки жидких отходов алюминиевого производства. Глава охватывает анализ дивариантных, моновариантных и нонвариантных равновесий в исследуемой многокомпонентной системе. Построена диаграмма состояния для основной системы, являющейся объектом исследования. На основе построенной диаграммы предложены методы селективного разделения твёрдых фаз в областях дивариантной кристаллизации.

Диссертация завершается общими выводами, рекомендациями по практическому применению полученных автором данных, а также списком использованной литературы и приложением.

В диссертационном исследовании приняты следующие сокращения и условные обозначения: Mb - мирабилит $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$; CaH - гидрокарбонат кальция $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$; Gb - глауберит $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot \text{CaSO}_4$; Gr - гипс $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$; Nk - нахколит NaHCO_3 ; Tr - трона $\text{NaHCO}_3 \cdot \text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$; Gl - гейлюссит $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{CaCO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$; Cc - кальцит CaCO_3 ; Na·10 - декагидрат карбоната натрия $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$; Na·1 - моногидрат карбоната натрия $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$; Te - тенардит Na_2SO_4 ; Pr - пирсонит $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{CaCO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$; Br - беркеит - $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{Na}_2\text{SO}_4$; 5C·Na·3 - $5\text{CaSO}_4 \cdot \text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$; 3Na·C - $3\text{NaHCO}_3 \cdot \text{Na}_2\text{CO}_3$; E - нонвариантная точка; MC - многокомпонентные системы; ПС - пятикомпонентная система; ЧС - четырёхкомпонентная система; ТДА - термический дифференциальный анализ; ТПС - триангуляция политопов системы; ФР - фазовые равновесия; ФК - фазовый комплекс; ОФХА - основы физико-химического анализа.

Определение политермы фазового комплекса химических систем и состояние изученности политермы пятикомпонентной системы

Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, CO_3^{2-} , HCO_3^- - H_2O

Графическое представление диаграмм водно-солевых взаимных систем осуществляется с помощью нескольких методов. Например, при использовании метода Левенгера концентрации веществ выражаются в молях-эквивалентах, отнесённых к 100 молям (или 1000 молям) воды, а в качестве координатных осей принимаются 4 ребра полуктаэдра, сходящиеся в одной вершине.

Представление четырёхкомпонентных взаимных систем базируется на методе Иенеке, где используется квадрат солевого состава, перпендикулярно которому откладывается количество молей воды на 100 молей солевой массы.

Один из ранних методов для графического изображения пятикомпонентных систем был предложен Буке-Скоутом. Согласно этому подходу, концентрации всех компонентов системы принимались за координаты одной точки в четырёхмерном пространстве, которая затем проецировалась на плоскость тетраэдра.

Особое место в графическом представлении многокомпонентных систем занимают работы Радищева. Он предложил использовать многомерные геометрические фигуры (политопы) для изображения состава многокомпонентных систем, преимущественно взаимных.

Сходный метод, дополненный некоторыми модификациями, был представлен Перельманом, который использовал для этих целей "неправильные" многомерные фигуры.

Вант-Гофф применил модифицированный метод Левенгера для графического изображения пятикомпонентной системы Na, K, Mg // SO_4 , Cl - H_2O . Она известна как «морская система», насыщенная хлоридом натрия и является усовершенствованным вариантом. В этом методе концентрация NaCl из диаграммы исключается. В системе протекают реакции обмена. Поэтому количество молей Na_2SO_4 используется как равнодействующая двух векторов, т.е. хлорида и сульфата магния.

Матричный метод представления многокомпонентных солевых систем использует таблицы-матрицы для отображения диаграмм солевого состава взаимных многокомпонентных систем, в которых фиксируются термодинамические и химические соотношения. Однако, такие таблицы-матрицы, определяя количество реакций обмена по компонентам, не способны полностью описать топологические связи между компонентами.

Харви с соавторами на основе термодинамического потенциала рассчитал фазовые ассоциаты для невариантных точек шестикомпонентной системы $\text{Na}, \text{K}, \text{Mg}, \text{Ca} \parallel \text{SO}_4, \text{Cl}-\text{H}_2\text{O}$ при температуре 25°C . При этом, устойчивость образовавшихся комбинаций твёрдых фаз определялась на основе изменения энергии Гиббса. Эффективность подобных расчётов прямо зависит от точности вычисления изменения энергии Гиббса, которая снижается с увеличением компонентности системы. Как отмечают сами авторы, достоверные результаты могут быть получены только для систем, не превышающих четырёх компонентов. Следует подчеркнуть, что диаграммы состояния многокомпонентных систем, независимо от метода их построения, зачастую непригодны для прямых графических расчётов из-за чрезмерного числа геометрических элементов (невариантные точки, моновариантные линии, дивариантные поля).

Метод триангуляции политопов диаграмм состава, используемый учёными для определения выпуклых политопов диаграмм состава $(n+1)$ компонентной системы, не позволяет получить конкретную диаграмму. Этот метод, используя алгоритмы, предлагает лишь модели диаграмм, но не может представить конкретную диаграмму, интегрирующую все физико-химические свойства. Поскольку традиционные методы построения диаграмм фазовых равновесий, основанные на измеряемых свойствах, неэффективны для исследования высококомпонентных систем, наиболее предпочтительным и универсальным является метод трансляции. Он применим для любых типов химических систем, состоящих из трёх и более компонентов.

Фазовые и поверхностные диаграммы систем с кристаллизацией только составляющих солей. Построение диаграмм состояния взаимных трёхкомпонентных систем по своей сути не имеет принципиальных отличий от построения диаграмм состояния обычных систем. Это обусловлено тем, что в обоих случаях на вертикальных осях геометрической формы (квадрата) откладывается температурная величина, на основе которой проводятся изотермические линии, разделяющие поля.

Построение поверхностных диаграмм таким же методом в совокупности с объёмами между ними формируют фазовые диаграммы исследуемой химической системы, которые по своей структуре аналогичны структурным диаграммам обычных трёхкомпонентных систем: сверху они ограничены поверхностью ликвидуса и с низу - поверхностью солидуса. Поверхность ликвидуса может быть разделена на поля первичной кристаллизации тех или иных фаз, двойных соединений или твёрдых растворов. Между поверхностями ликвидуса и солидуса располагаются объёмы первичной и вторичной кристаллизации, которые отделены друг от друга.

Поверхностные диаграммы, построенные данным методом, обладают рядом геометрических свойств, характерных для обычных трёхкомпонентных систем. В них применимы правила рычага, центра тяжести и прямой, соединяющей Ван Рейн - Алкемаде. На таких диаграммах могут присутствовать невариантные эвтонические и эвтектические точки. Пограничные линии могут быть конгруэнтными и инконгруэнтными. Траектории кристаллизации определяются аналогично тому, как это делается для обычных трёхкомпонентных систем.

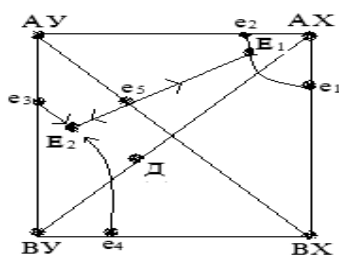


Рисунок 1. – Диаграмма состояния необратимого взаимного обмена со стабильной диагональю AX-BY

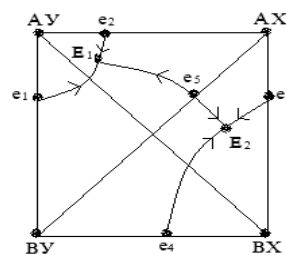


Рисунок 2. – Диаграмма состояния необратимого взаимного обмена со стабильной диагональю AY-BX

На рисунке 1 показана одна из таких диаграмм, где диагональ АУ-ВХ разделяет общую диаграмму на две обычные трёхкомпонентные системы: ВХ-АУ-АХ и ВХ-АУ-ВУ. В каждой из этих трёхкомпонентных систем присутствуют все соответствующие геометрические элементы. Для первой трёхкомпонентной системы (ВХ-АУ-АХ): трёхфазная эвтектика E_1 с тремя пограничными линиями E_1e_1 , E_1e_2 и E_1e_5 . Для второй трёхкомпонентной системы (ВХ-АУ-ВУ): трёхфазная эвтектика E_2 с тремя пограничными линиями E_2e_3 , E_2e_4 и E_2e_5 . В первой системе присутствуют поля кристаллизации: АУ $e_2E_1e_5$ (для компонента АУ); АХ $e_2E_1e_1$ (для компонента АХ) и ВХ $e_1E_1e_5$ (для компонента ВХ). Во второй системе присутствуют поля: ВУ $e_3E_2e_4$ (для компонента ВУ); ВХ $e_4E_2e_5$ (для компонента ВХ) и АУ $e_3E_2e_5$ (для компонента АУ). Поле кристаллизации компонента АУ объединяется с его полем во второй системе. Аналогичная ситуация имеет место для поля кристаллизации ВХ. Таким образом, на представленной диаграмме присутствуют четыре поля кристаллизации.

Диагональ АУ-ВХ называется квадратной. В взаимных системах такие диагонали соединяют точки, в которых вещества осаждаются из расплава их смесей в чистом виде или в виде соединения всех четырех компонентов, то есть без протекания реакции обмена. Стабильная (устойчивая) диагональная линия пересекает пограничную линию между двумя эвтектиками, образуя седловую точку (e_3) которая представляет собой эвтектическую точку этого пересечения и является максимумом на кривой ограничения.

Таким образом, стабильной (устойчивой) диагональю называют линию квазибинарного разреза. В трёхфазных эвтектиках системы, показанной на рисунке 1, кристаллизуется смесь солей АУ-ВХ-АХ (эвтектика E_1) и ВУ+АУ+ВХ (эвтектика E_2). Пара солей, входящих в состав конечного продукта затвердевания эвтектического расплава, называется стабильной (устойчивой) парой. Другой диагональный разрез (АХ-ВУ) не образует бинарной системы. Например, если расплавить смесь этих двух солей (точка Д) и охладить этот расплав, то в процессе первичной кристаллизации не образуются ни соль АХ, ни - ВУ, а образуется соль ВХ, которая является продуктом взаимодействия АХ и ВУ. На второй стадии кристаллизации образуется смесь солей ВХ+ВУ, а на третьей стадии - совокупность солей ВХ, ВУ и АУ, образующих стабильную диагональ.

На рисунке 2 представлена диаграмма взаимной трёхкомпонентной системы А, // Х, У со стабильной диагональю АХ-ВУ, где расположение полей кристаллизации отличается от диаграммы, представленной на рисунке 1. Вместе с тем, возможно существование систем, в которых отсутствует квазибинарный разрез (сечение). Такие системы обычно называют обратимо-взаимными. Пример структуры такой диаграммы представлен на рисунке 3.

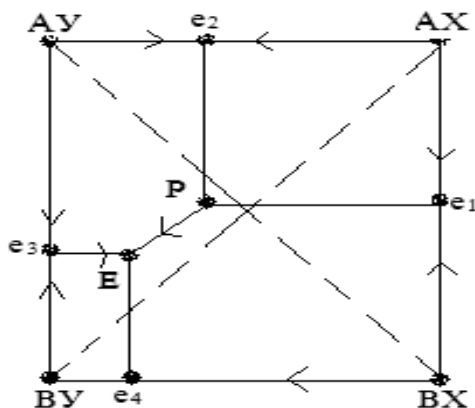


Рисунок 3. – Диаграмма состояния обратимой взаимной трёхкомпонентной системы

На рисунке 3 точка Р соответствует равновесию трёх твёрдых фаз АХ+АУ+ВХ с насыщенным раствором, но она отличается от эвтектики E_1 на рисунке 1 тем, что вместо

совместной кристаллизации трёх равновесных твёрдых фаз здесь протекает инконгруэнтный процесс: соль АХ растворяется, а соли АУ и ВХ выделяются. Если в исходной смеси отсутствует необходимое количество компонента ВУ для полного превращения солей АХ и АУ, то кристаллизация завершается в перитектической точке (Р). В противном случае, кристаллизация завершается в эвтонической точке с образованием совокупности солей АХ, ВХ и ВУ. В таких обратимо-взаимных диаграммах невариантные точки локализуются по одну сторону от диагонали, соединяющей пары солей системы.

Пара солей, в нашем примере АХ+АУ, которая выделяется в обеих невариантных точках, формирует стабильную пару системы. Таким образом, в обратимо-взаимных системах, даже при отсутствии стабильных диагоналей, всегда существуют стабильные пары солей, которые входят в состав любой смеси расплава системы.

Исходя из вышеизложенного, для исследования политермы фазового комплекса и растворимости пятикомпонентной системы Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, CO_3^{2-} , HCO_3^- - H_2O , а также её составляющих четырёх- и трёхкомпонентных подсистем, мы использовали метод трансляции, предложенный одним из основоположников физико-химического анализа, Лутфулло Солиевым.

Сводные данные о состоянии изученности политермы пятикомпонентной системы Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, CO_3^{2-} , HCO_3^- - H_2O , её 5-ти четырёхкомпонентных и 9-ти трёхкомпонентных подсистем представлены в таблице 1.

Таблица 1. – Пятикомпонентная система Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{CO}_3^{2-}$, HCO_3^- , SO_4^{2-} , - H_2O , её трёх-, четырёхкомпонентные подсистемы и состояние их изученности

Системы	К-ность	Изотерма, °С				
		0	25	50	75	100
Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, CO_3^{2-} , HCO_3^- - H_2O	5	-	-	-	-	-
5Na^+ - SO_4^{2-} - CO_3^{2-} - HCO_3^- - H_2O	4	-	-	-	-	-
3Ca^{2+} - SO_4^{2-} - CO_3^{2-} - 2HCO_3^- - H_2O	4	-	-	-	-	-
Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, CO_3^{2-} - H_2O	4	-	-	-	-	-
Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, HCO_3^- - H_2O	4	-	-	-	-	-
Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{CO}_3^{2-}$, HCO_3^- - H_2O	4	-	-	-	-	-
2Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel 2\text{SO}_4^{2-}$ - H_2O	3	-	-	-	-	-
2Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{CO}_3^{2-}$ - H_2O	3	-	-	+	+	+
$4\text{Na}^+ \parallel \text{SO}_4^{2-}$, CO_3^{2-} - H_2O	3	+	+	+	+	+
$2\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, CO_3^{2-} - H_2O	3	+	+	+	+	+
$3\text{Na}^+ \parallel \text{SO}_4^{2-}$, HCO_3^- - H_2O	3	+	+	+	+	+
$3\text{Na}^+ \parallel \text{CO}_3^{2-}$, HCO_3^- - H_2O	3	+	+	+	+	+
$2\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, 2HCO_3^- - H_2O	3	-	-	-	-	-
$\text{Ca}^{2+} \parallel \text{CO}_3^{2-}$, HCO_3^- - H_2O	3	-	-	-	-	-
Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel 3\text{HCO}_3^-$ - H_2O	3	-	-	-	-	-

Анализ таблицы 1 (которая резюмирует состояние изученности) свидетельствует о том, что пятикомпонентная система Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, CO_3^{2-} , HCO_3^- - H_2O практически не исследована. Из пяти четырёхкомпонентных подсистем, только одна, 5Na^+ - SO_4^{2-} - CO_3^{2-} - HCO_3^- - H_2O была частично изучена на трёхкомпонентном уровне, однако, полные диаграммы растворимости или фазовых комплексов для неё отсутствуют. Системы 3Ca^{2+} - SO_4^{2-} - CO_3^{2-} - 2HCO_3^- - H_2O , Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, CO_3^{2-} - H_2O , Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, HCO_3^- - H_2O , Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{CO}_3^{2-}$, HCO_3^- - H_2O не были исследованы вообще. Их фазовые, политермические диаграммы не построены. Остальные трёхкомпонентные подсистемы также не изучены в выбранных для данного исследования температурных интервалах, и их политермические диаграммы растворимости и фазовых комплексов не построены.

Политерма фазового комплекса системы Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, CO_3^{2-} , HCO_3^- - H_2O на уровне четырёхкомпонентного состава

В предыдущих работах метод трансляции применялся как переход геометрических изображений на диаграммах состояния из области n -компонентного состава в область $n+1$ -компонентного состава. Трансляция также осуществляется по направлению любого нового параметра состояния: температура, давление, химический потенциал и т.д., при этом компонентный состав диаграммы состояния остаётся неизменным.

При трансляции в направлении увеличения компонентности, диаграммы состояния частичных систем, состоящих из n - компонентов (изотермы или политермы), служат исходными данными для построения диаграммы состояния общей системы, состоящей из $n+1$ компонентов. Для построения политермы n -компонентной системы методом трансляции в качестве исходных данных используются изотермы этой системы. Диаграммы растворимости традиционно строятся в форме изотермических разрезов (изотерм растворимости), что значительно удобнее для экспериментальной реализации, поскольку легче проводить опыты при постоянной температуре. Диаграммы плавкости же удобнее строить в форме политерм, используя кривые нагрева и охлаждения на термограммах. В настоящей работе метод трансляции использован в обоих вариантах.

Политерма четырёхкомпонентной системы $5\text{Na}^+ \text{--} \text{SO}_4^{2-} \text{--} \text{CO}_3^{2-} \text{--} \text{HCO}_3^- \text{--} \text{H}_2\text{O}$ с общим ионом (Na^+) в интервале температур $0 \div 100$ °C. Изотерма 0 °C. Согласно литературным источникам, трёхкомпонентные подсистемы: $3\text{Na}^+ \text{--} \text{SO}_4^{2-} \text{--} \text{HCO}_3^- \text{--} \text{H}_2\text{O}$; $3\text{Na}^+ \text{--} \text{CO}_3^{2-} \text{--} \text{HCO}_3^- \text{--} \text{H}_2\text{O}$ и $4\text{Na}^+ \text{--} \text{SO}_4^{2-} \text{--} \text{CO}_3^{2-} \text{--} \text{H}_2\text{O}$ хорошо изучены при 0 °C. Они характеризуются одной невариантной точкой каждая: E_1^3 , E_2^3 и E_3^3 с твёрдыми фазами Mb+Nk, Na10+Nk и Mb+Na10. Эти точки, после трансляции и ограничения на уровне общего четырёхкомпонентного состава, сливаются в одну невариантную точку E_1^4 с равновесием фаз Mb + Na·10 + Nk

Изотерма 25 °C. На данной изотерме количество невариантных точек в трёхкомпонентных подсистемах составляет: $3\text{Na}^+ \text{--} \text{SO}_4^{2-} \text{--} \text{HCO}_3^- \text{--} \text{H}_2\text{O} - E_1^3 = \text{Mb} + \text{Nk}$; $3\text{Na}^+ \text{--} \text{CO}_3^{2-} \text{--} \text{HCO}_3^- \text{--} \text{H}_2\text{O} - E_2^3 = \text{Mb} + \text{Tr}$, $E_3^3 = \text{Tr} + \text{Na10}$; $4\text{Na}^+ \text{--} \text{SO}_4^{2-} \text{--} \text{CO}_3^{2-} \text{--} \text{H}_2\text{O} - E_4^3 = \text{Na10} + \text{Mb}$. В результате добавления четвёртого компонента и трансформации на общем уровне, невариантные точки транслируются, образуя две невариантные точки E_1^4 и E_2^4 с равновесными фазами Mb + Nk + Tr и Na10 + Tr + Mb, соответственно.

Изотермы 50 и 75 °C. Повышение температуры в данной системе приводит к фазовым переходам, связанным с превращениями в трёхкомпонентных подсистемах. Нонвариантные равновесия в подсистемах: $E_1^3 = \text{Te} + \text{Nk}$ для системы $3\text{Na}^+ \text{--} \text{SO}_4^{2-} \text{--} \text{HCO}_3^- \text{--} \text{H}_2\text{O}$, $E_2^3 = \text{Nk} + \text{Tr}$, $E_3^3 = \text{Na1} + \text{Tr}$ для системы $3\text{Na}^+ \text{--} \text{CO}_3^{2-} \text{--} \text{HCO}_3^- \text{--} \text{H}_2\text{O}$ и $E_4^3 = \text{Te} + \text{Br}$, $E_5^3 = \text{Br} + \text{Na} \cdot 1$ для системы $4\text{Na}^+ \text{--} \text{SO}_4^{2-} \text{--} \text{CO}_3^{2-} \text{--} \text{H}_2\text{O}$. На уровне следующего компонентного состава (четырёхкомпонентного) невариантные равновесия системы включают: E_2^4 : фазы Na1 + Br + Tr; E_3^4 : фазы Nk + Br + Tr. Как видно, фазовые равновесия в изотермах 50 и 75 °C идентичны.

Изотерма 100 °C. Увеличение температуры от 75 до 100 °C вызывает фазовое превращение в подсистеме $3\text{Na}^+ \text{--} \text{CO}_3^{2-} \text{--} \text{HCO}_3^- \text{--} \text{H}_2\text{O}$. При взаимодействии нахколита и троны образуется смешанная соль $3\text{Na} \cdot \text{C}$, что приводит к изменению структуры диаграммы. Вследствие указанных превращений, при 100 °C в данной четырёхкомпонентной системе наблюдается максимальная насыщенность геометрическими элементами. Четверные невариантные точки, определяющие границы фазовых полей на данном изотермическом уровне, представлены следующими равновесными ассоциатами: $E_6^4 = \text{Nk} + \text{Te} + \text{Gb}$; $E_7^4 = \text{CaH} + \text{Gb} + \text{Gr}$; $E_8^4 = \text{Gb} + \text{CaH} + \text{Nk}$.

Политерма системы $3\text{Ca}^{2+} \text{--} \text{SO}_4^{2-} \text{--} \text{CO}_3^{2-} \text{--} 2\text{HCO}_3^- \text{--} \text{H}_2\text{O}$ (с общим ионом Ca^{2+}) в интервале $0 \div 100$ °C. Система $3\text{Ca}^{2+} \text{--} \text{SO}_4^{2-} \text{--} \text{CO}_3^{2-} \text{--} 2\text{HCO}_3^- \text{--} \text{H}_2\text{O}$ характеризуется общим катионом кальция и содержит следующие кальцийсодержащие химические соединения: CaSO_4 ; CaCO_3 ; $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ и H_2O . Она подразделяется на трёхкомпонентные подсистемы: $2\text{Ca}^{2+} \text{--} \text{SO}_4^{2-} \text{--} \text{CO}_3^{2-} \text{--} \text{H}_2\text{O}$, $2\text{Ca}^{2+} \text{--} \text{SO}_4^{2-} \text{--} 2\text{HCO}_3^- \text{--} \text{H}_2\text{O}$ и $2\text{Ca}^{2+} \text{--} \text{CO}_3^{2-} \text{--} 2\text{HCO}_3^- \text{--} \text{H}_2\text{O}$. Анализ

литературных данных показывает, что эта четырёхкомпонентная система не изучена. Для неё теоретически возможны следующие простые эвтонические неинвариантные точки на уровне трёхкомпонентных подсистем: $2\text{Ca}^{2+}\text{-SO}_4^{2-}\text{-CO}_3^{2-}\text{-H}_2\text{O} - \text{E}_1^3 = \text{Gr} + \text{CaH}$; $2\text{Ca}^{2+}\text{-SO}_4^{2-}\text{-2HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O} - \text{E}_2^3 = \text{Cc} + \text{CaG}$ и $2\text{Ca}^{2+}\text{-CO}_3^{2-}\text{-2HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O} - \text{E}_3^3 = \text{Gr} + \text{Cc}$. В результате трансляции (добавления четвёртого компонента) в общую систему, эти неинвариантные точки объединяются в одну неинвариантную точку четырёхкомпонентного состава, которую можно математически представить как: $\text{E}_1^3 + \text{E}_2^3 + \text{E}_3^3 \rightarrow \text{E}_1^4 = \text{Gr} + \text{Cc} + \text{CaH}$. Такое фазовое равновесие характерно для всей области температур $0 \div 100$ °С в данной системе.

Политерма четырёхкомпонентной взаимной водно-солевой системы сульфатов и карбонатов натрия и кальция в интервале $0 \div 100$ °С. Изотерма 0 °С. Это четырёхкомпонентная взаимная система объединяет следующие трёхкомпонентные подсистемы: $4\text{Na}^+\text{-SO}_4^{2-}\text{-CO}_3^{2-}\text{-H}_2\text{O}$; $2\text{Na}^+\text{-Ca}^{2+}\text{-2SO}_4^{2-}\text{-H}_2\text{O}$; $2\text{Na}^+\text{-Ca}^{2+}\text{-2CO}_3^{2-}\text{-H}_2\text{O}$ и $2\text{Ca}^{2+}\text{-SO}_4^{2-}\text{-2HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$. На уровне подсистем исследуемая система характеризуется при 0 °С пятью неинвариантными точками. Их можно транслировать на уровень четырёхкомпонентного состава. Это приведёт к образованию трёх неинвариантных точек E_1^4 , E_2^4 и E_3^4 . Они имеют следующие равновесные фазы: $\text{Mb} + \text{Gl} + \text{Na} \cdot 10$, $\text{Gr} + \text{Cc} + \text{Gl}$ и $\text{Mb} + \text{Gr} + \text{Gl}$.

Изотерма 25 °С. На данной изотерме увеличивается количество геометрических элементов, особенно неинвариантных точек, что связано с фазовым превращением в подсистеме $2\text{Na}^+\text{-Ca}^{2+}\text{-2SO}_4^{2-}\text{-H}_2\text{O}$. Установлено, что в результате взаимодействия таких компонентов, как кальцит и декагидрат карбоната натрия, инициируется синтез новой фазы — глауберита, представляющего собой двойную сульфатную соль натрия и кальция. Данное явление предопределяет установление следующих неинвариантных равновесий в исследуемой подсистеме: $\text{Mb} + \text{Na} \cdot 10$ для точки E_1^3 ; $\text{Gb} + \text{Mb} = \text{E}_2^3$; $\text{Gr} + \text{Gb} = \text{E}_3^3$; $\text{Cc} + \text{Gr} = \text{E}_4^3$; $\text{Na} \cdot 10 + \text{Gl} = \text{E}_5^3$ и $\text{Gl} + \text{Cc}$. Ниже представлен перевод данного фрагмента на русский язык. Текст адаптирован под строгий академический стиль, характерный для диссертационных исследований в области физико-химического анализа многокомпонентных систем. При переходе к анализу четырёхкомпонентного состава системы установлены стабильные ассоциаты равновесных фаз, локализованные в соответствующих неинвариантных точках: $\text{Mb} + \text{Na}10 + \text{Gb}$, $\text{Gb} + \text{Gr} + \text{Cc}$, $\text{Na}10 + \text{Gl} + \text{Gb}$, $\text{Gl} + \text{Gb} + \text{Cc}$ для точек E_7^4 , E_8^4 , E_9^4 и E_{10}^4 .

Изотерма 50 °С. Повышение температуры с 25 до 50 °С приводит к фазовым трансформациям в данной системе, что выражается в изменении числа геометрических форм. Эти изменения происходят за счет дегидратации кристаллогидратов средних и двойных солей. Например, в трёхкомпонентной подсистеме $4\text{Na}^+\text{-SO}_4^{2-}\text{-CO}_3^{2-}\text{-H}_2\text{O}$ мирабилит и карбонат натрия декагидрат теряют 10 и 9 молекул воды, соответственно, превращаясь в тенардит и термонарит. В дальнейшем эти соединения вступают в химическое взаимодействие, образуя новую фазу — беркеит, что изменяет структуру диаграммы при 50 °С. На четырёхкомпонентном уровне система характеризуется следующими неинвариантными точками с соответствующими равновесными твёрдыми фазами: $\text{E}_8^3 = \text{Te} + \text{Br} + \text{Gr}$; $\text{E}_9^3 = \text{Gb} + \text{Gr} + \text{Cc}$; $\text{E}_{10}^3 = \text{Br} + \text{Pr} + \text{NaI}$; $\text{E}_{11}^3 = \text{Gb} + \text{Pr} + \text{Cc}$; $\text{E}_{12}^3 = \text{Gb} + \text{Pr} + \text{Br}$.

Изотерма 75 °С. В ходе исследования установлено, что максимальное количество геометрических форм в данной системе наблюдается на изотерме 75 °С. Это связано с образованием новой равновесной фазы - $5\text{Ca} \cdot \text{Na} \cdot 3$. Формирование этой фазы происходит в подсистеме $2\text{Na}^+\text{-Ca}^{2+}\text{-SO}_4^{2-}\text{-H}_2\text{O}$ в результате взаимодействия кристаллогидрата гипса и двойной соли глауберита. Неинвариантные равновесия отмечены в трёхкомпонентных подсистемах: $4\text{Na}^+\text{-SO}_4^{2-}\text{-CO}_3^{2-}\text{-H}_2\text{O}$, $\text{E}_{12}^3 = \text{Te} + \text{Gb}$; $\text{E}_{13}^3 = \text{Gb} + 5\text{Ca} \cdot \text{Na} \cdot 3$; $\text{E}_{14}^3 = \text{Gr} + 5\text{Ca} \cdot \text{Na} \cdot 3$ в системе $2\text{Na}^+\text{-Ca}^{2+}\text{-SO}_4^{2-}\text{-H}_2\text{O}$, $\text{E}_8^3 = \text{Cc} + \text{Gr}$ в системе $2\text{Ca}^{2+}\text{-CO}_3^{2-}\text{-SO}_4^{2-}\text{-H}_2\text{O}$, $\text{E}_{15}^3 = \text{NaI} + \text{Pr}$; $\text{E}_{16}^3 = \text{Pr} + \text{Cc}$ в системе $2\text{Na}^+\text{-Ca}^{2+}\text{-CO}_3^{2-}\text{-H}_2\text{O}$. Равновесные фазы установлены в неинвариантных точках четырёхкомпонентного состава: $\text{E}_9^4 = \text{Te} + \text{Br} + \text{Gb}$;

$E_{10}^4 = NaI + Br + Pr$; $E_{11}^4 = 5Ca \cdot Na \cdot 3 + Gr + Cc$; $E_{12}^4 = Br + Gb + 5Ca \cdot Na \cdot 3$; $E_{13}^4 = Cc + Pr + 5Ca \cdot Na \cdot 3$ и $E_{14}^4 = Br + Pr + 5Ca \cdot Na \cdot 3$.

Изотерма 100 °С. На этой изотерме в результате температурного воздействия исчезает фаза $5Ca \cdot Na \cdot 3$, которая была стабильна при 75 °С, что приводит к некоторому упрощению структуры диаграммы фазового комплекса. Отмечены неинвариантные точки трёхкомпонентных подсистем: $4Na^+ - SO_4^{2-} - CO_3^{2-} - H_2O - E_5^3 = Te + Br$, $E_6^3 = Br + NaI$; система $2Na^+ - Ca^{2+} - 2SO_4^{2-} - H_2O - E_{13}^3 = Te + Gb$, $E_{14}^3 = Gb + Gr$; системы $2Ca^{2+} - CO_3^{2-} - SO_4^{2-} - H_2O - E_9^3 = Cc + Gr$; системы $2Na^+ - Ca^{2+} - 2CO_3^{2-} - H_2O - E_{15}^3 = NaI + Pr$, $E_{16}^3 = Pr + Cc$. Неинвариантные точки четырёхкомпонентного состава, образованные в результате ограничения моновариантных линий со своими равновесными твёрдыми фазами: $E_9^4 = Te + Br + Gb$; $E_{10}^4 = NaI + Br + Pr$; $E_{11}^4 = Gb + Gr + Cc$; $E_{12}^4 = Cc + Gb + Pr$ и $E_{13}^4 = Br + Pr + Gb$.

Политерма четырёхкомпонентной водно-солевой взаимной системы сульфатов и гидрокарбонатов натрия и кальция в интервале 0÷100 °С. Изотерма 0 °С. Физико-химическая система Na^+ , $Ca^{2+} || SO_4^{2-}$, $HCO_3^- - H_2O$ включает следующие трёхкомпонентные подсистемы: $2Na^+ - Ca^{2+} - 2SO_4^{2-} - H_2O$; $Na^+ - Ca^{2+} - 3HCO_3^- - H_2O$; $3Na^+ - SO_4^{2-} - HCO_3^- - H_2O$; $2Ca^{2+} - SO_4^{2-} - 2HCO_3^- - H_2O$. Для всех трёхкомпонентных подсистем характерна одна неинвариантная точка: $E_1^3 = Mb + Nk$, $E_2^3 = Nk + CaH$, $E_3^3 = Gr + CaH$ и $E_4^3 = Mb + Gr$. Неинвариантные точки четырёхкомпонентной системы, полученные в результате трансляции на изотерме 0 °С E_3^4 и E_4^4 со следующими равновесными фазами: $Gr + Mb + Nk$ и $Gr + Nk + CaH$.

Изотерма 25 °С. Неинвариантные точки исследуемой системы, определённые методом трансляции при 25 °С, это E_4^4 , E_5^4 и E_6^4 . Эти точки соответствуют равновесию следующих фаз: $Nk + Mb + Gb$, $CaH + Gb + Gr$ и $Gb + CaH + Nk$. Эти неинвариантные точки образуются при ограничении моновариантных линий, полученных в результате трансформации следующих равновесий подсистем: $E_1^3 = Nk + Mb$; $E_2^3 = CaH + Nk$; $E_3^3 = Gr + CaH$; $E_4^3 = Mb + Gb$ и $E_5^3 = Gb + Gr$.

Изотерма 50 °С. Количество геометрических форм в системе на изотерме 50 °С равно их количеству на изотерме 25 °С. Единственное отличие заключается в фазовом переходе мирабилита в тенардит. Эта трансформация изменяет равновесие в точках, где присутствовал мирабилит. Примером являются точки E_1^3 и E_5^3 , которые теперь выражают фазовое состояние $Te + Nk$ и $Gb + Te$.

Изотерма 75 °С. Геометрические формы, которые при ограничении общего компонентного пространства образуют неинвариантные точки на общем компонентном уровне, более многочисленны по сравнению с изотермой 50 °С (18 : 16). Это связано с взаимодействием компонентов в трёхкомпонентной подсистеме $2Na^+ - Ca^{2+} - 2SO_4^{2-} - H_2O$, где наблюдается образование равновесной фазы $5Ca \cdot Na \cdot 3$ между сульфатами натрия и кальция. Неинвариантные точки трёхкомпонентного состава и их равновесные фазы: $E_9^3 = Nk + Te$; $E_{10}^3 = CaH + Nk$; $E_{11}^3 = Gr + CaH$; $E_{12}^3 = Te + Gr$; $E_{13}^3 = Gb + 5Ca \cdot Na \cdot 3$; $E_{14}^3 = 5Ca \cdot Na \cdot 3 + Gr$. Неинвариантные точки четырёхкомпонентного состава: $Nk + Te + Gb = E_5^4$, $CaH + Gr + 5Ca \cdot Na \cdot 3 = E_6^4$, $Gb + CaH + Nk = E_7^4$, $Gb + CaH + 5Ca \cdot Na \cdot 3 = E_8^4$.

Изотерма 100 °С. Повышение температуры от 75 до 100 °С вызывает фазовое изменение в одной из подсистем $3Na^+ - CO_3^{2-} - HCO_3^- - H_2O$ — образование смешанной соли $3Na \cdot C$ из нахколита и троны, что вносит изменения в структуру диаграммы. Максимальное количество геометрических форм в данной четырёхкомпонентной системе наблюдается на изотерме 100 °С. Неинвариантные точки четырёхкомпонентного состава: $E_6^4 = Nk + Te + Gb$; $E_7^4 = CaH + Gb + Gr$; $E_8^4 = Gb + CaH + Nk$.

Политерма четырёхкомпонентной водно-солевой взаимной системы карбонатов и гидрокарбонатов натрия и кальция 0÷100 °С. Изотерма 0 °С. Состав данной системы представлен четырьмя трёхкомпонентными подсистемами, составляющими грани тетраэдра её диаграммы: $3Na^+ - CO_3^{2-} - HCO_3^- - H_2O$; $2Na^+ - Ca^{2+} - CO_3^{2-} - H_2O$; $Na^+ - Ca^{2+} - HCO_3^- - H_2O$ и

$\text{Ca}^{2+}\text{--CO}_3^{2-}\text{--HCO}_3^-\text{--H}_2\text{O}$. На изотерме 0°C для подсистем характерно 5 невариантных точек. Их трансляция на уровень четырёхкомпонентного состава приводит к образованию трёх невариантных точек E_8^4 , E_9^4 и E_{10}^4 со следующими равновесными фазами: $\text{Na}\cdot 10 + \text{Nk} + \text{Gl}$, $\text{Cc} + \text{Gl} + \text{CaH}$ и $\text{Nk} + \text{CaH} + \text{Gl}$.

Изотерма 25°C . На данной изотерме увеличивается количество геометрических форм, особенно невариантных точек, что связано с фазовым превращением в подсистеме $3\text{Na}^+\text{--CO}_3^{2-}\text{--HCO}_3^-\text{--H}_2\text{O}$. Это обусловлено образованием двойной соли глауберита из нахколита и декагидрата карбоната натрия. Нонвариантные равновесия в трёхкомпонентных подсистемах: E_1^3 : $\text{Na}\cdot 10 + \text{Tr}$; E_2^3 : $\text{Tr} + \text{Nk}$. Другие равновесия: $\text{Na}\cdot 10 + \text{Gl} = E_3^3$; $\text{Gl} + \text{Cc} = E_4^3$; $\text{Cc} + \text{CaH} = E_5^3$ и $\text{CaH} + \text{Nk} = E_6^3$. На уровне четырёхкомпонентного состава в равновесии находятся следующие фазы в невариантных точках: E_{11}^4 : $\text{Na}10 + \text{Tr} + \text{Gl}$, E_{12}^4 : $\text{Tr} + \text{Nk} + \text{CaH}$, E_{13}^4 : $\text{Cc} + \text{Gl} + \text{CaH}$, E_{14}^4 : $\text{Tr} + \text{CaH} + \text{Gl}$.

Изотермы 50 и 75°C . Повышение температуры в интервалах 25 до 50 и от 50 до 75°C вызывает фазовые превращения, но при этом количество геометрических форм не изменяется (остаётся одинаковым на обеих изотермах). Фазовые изменения проявляются в дегидратации декагидрата карбоната натрия с переходом в термонатрит и дегидратации гейлусита с образованием пирсонита.

Изотерма 100°C . Установлено, что максимальное количество геометрических форм в данной системе наблюдается на изотерме 100°C . Это связано с образованием новой равновесной фазы $3\text{Na}\cdot\text{C}$, которая формируется в подсистеме $3\text{Na}^+\text{--CO}_3^{2-}\text{--HCO}_3^-\text{--H}_2\text{O}$ в результате взаимодействия троны и нахколита. Нонвариантные точки трёхкомпонентных подсистем и их равновесные фазы: $E_{17}^3 = \text{Na}1 + \text{Tr}$; $E_{18}^3 = \text{Tr} + 3\text{Na}\cdot\text{C}$; $E_{19}^3 = 3\text{Na}\cdot\text{C} + \text{Nk}$ в системе $3\text{Na}^+\text{--CO}_3^{2-}\text{--HCO}_3^-\text{--H}_2\text{O}$, $E_{15}^3 = \text{Na}1 + \text{Pr}$; $E_{16}^3 = \text{Pr} + \text{Cc}$ в системе $2\text{Na}^+\text{--Ca}^{2+}\text{--}2\text{CO}_3^{2-}\text{--H}_2\text{O}$, $E_{20}^3 = \text{Cc} + \text{CaH}$ в системе $2\text{Ca}^{2+}\text{--CO}_3^{2-}\text{--}2\text{HCO}_3^-\text{--H}_2\text{O}$, $E_{21}^3 = \text{CaH} + \text{Nk}$ в системе $\text{Na}^+\text{--Ca}^{2+}\text{--}3\text{HCO}_3^-\text{--H}_2\text{O}$. Нонвариантные точки четырёхкомпонентного состава со своими равновесными твёрдыми фазами: $E_{14}^4 = \text{Na}1 + \text{Tr} + \text{Pr}$; $E_{15}^4 = \text{Cc} + \text{Pr} + \text{CaH}$; $E_{16}^4 = 3\text{Na}\cdot\text{C} + \text{Nk} + \text{CaH}$; $E_{17}^4 = 3\text{Na}\cdot\text{C} + \text{Tr} + \text{Pr}$ и $E_{18}^4 = 3\text{Na}\cdot\text{C} + \text{Pr} + \text{CaH}$.

Политерма структуры фазового комплекса пятикомпонентной системы



Основная особенность построения диаграмм фазовых комплексов многокомпонентных систем (МКС) при применении метода трансляции. На одной диаграмме используют топологические свойства геометрических изображений простых и сложных систем. Это позволяет построить диаграмму фазового комплекса, являющуюся самостоятельной составной частью диаграммы состояния. Такой подход отображает все фазовые равновесия в виде геометрических фигур. Кроме того, так можно определить их взаимное расположение без их точных координат.

При использовании метода трансляции формируется сложная $(n+1)$ – компонентная система добавлением нового компонента к простой n -компонентной системе. При этом, размерность структурных изображений системы увеличивается. Например, невариантные точки переходят в моновариантные кривые, последние – в дивариантные поля, которые могут образовать объёмы и т. д.

На уровне общего $(n+1)$ -компонентного состава геометрические фигуры встречаются друг с другом. Они формируют геометрические изображения общей системы. Так, невариантные точки пересекаются и формируют моновариантные кривые, которые затем образуют дивариантные поля. Последние создают объёмы и замкнутую диаграмму фазового

комплекса общей системы. Далее описывается как в геометрических образах отображается фазовый комплекс.

Нонвариантные точки. Пересечение геометрических изображений возможно в соответствии с правилом фаз Гиббса только когда они отличаются друг от друга на одну фазу. Для общей системы потенциальные нонвариантные точки определяются методом сочетания, математически. Для частичных систем нонвариантные точки отличаются друг от друга на одну фазу. Они соединяются (сочетаются), этот метод назван «сквозной трансляцией». Это реализуется на диаграмме фазового равновесия пересечением моновариантных кривых. Они берут начало от нонвариантных точек различных типов частичных систем (рис. 4, а). На приведенном рисунке треугольный знак означает, что 2 четверные точки E_1^4 и E_2^4 относятся к разным системам. Они связаны одной тройной нонвариантной точкой. Она переходит в моновариантную кривую в области четверного состава. Появление группы нонвариантных точек с одинаковым фазовым составом осадков возможно при двухсторонней трансляции. Они будут отражаться на изотермах фазового комплекса как одна нонвариантная точка. Она формируется пересечением более чем двух моновариантных кривых.

Нонвариантные точки, не нашедшие партнёров для сочетания в других частичных системах, транслируются в область общего состава по «одностороннему» типу. Такая трансляция реализуется через пересечение моновариантной кривой (рис. 4, б, точка E_2^5). Нонвариантные точки общей системы могут возникнуть при пересечении моновариантных кривых (рис 4, в, точка E_4^5). Они называются «промежуточно определёнными».

Определённые методом трансляции нонвариантные точки общей системы могут оказаться больше нужного количества для замыкания геометрических фигур. В таком случае, при построении диаграммы фазового комплекса находятся нонвариантные точки, не участвующие в замыкании геометрических изображений. Они отбрасываются как лишние.

Моновариантные кривые. Моновариантные кривые в многокомпонентных системах (МКС) имеют двойственный характер происхождения. Это означает, что причиной могут быть возникновение двух различных источников в рамках диаграммы фазового комплекса как результат трансляции нонвариантных точек частичных систем в область общего состава (на рис. 4, а они условно обозначены пунктирными линиями: $E_1^4 \text{---} E_1^5$; $E_2^4 \text{---} E_1^5$; $E_3^4 \text{---} E_2^5$; $E_4^4 \text{---} E_3^5$). Они могут возникать как соединительные линии между нонвариантными точками общей системы (на рисунке 4, б обозначены жирными сплошными линиями: $E_1^5 \text{---} E_2^5$; $E_1^5 \text{---} E_4^5$; $E_3^5 \text{---} E_4^5$). Кривые первого типа могут быть предсказаны, поскольку они являются транслированной формой нонвариантных точек частичных систем. Остальные определяются в процессе построения замкнутой диаграммы фазового комплекса исследуемой системы Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, CO_3^{2-} , $\text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$.

При проведении моновариантных кривых между нонвариантными точками общей системы возможно появление двух и более кривых с одинаковым фазовым составом осадков. В этом случае, лишними оказываются моновариантные кривые, которые не участвуют в замыкании структурных фигур диаграммы фазового комплекса.

Дивариантные поля. Дивариантные поля в МКС могут возникать в результате трансляции моновариантных кривых частичных систем в область общей системы. Этот процесс позволяет нам понять сложные фазовые взаимоотношения в рамках сложных систем. Например, дивариантные поля, насыщенные двумя фазами $\text{AX}+\text{BX}$, $\text{AX}+\text{BY}$ и $\text{BX}+\text{CX}$ (рис. 4), возникают в результате трансляции моновариантных кривых $E_1^4 \text{---} E_2^4$, $E_2^4 \text{---} E_3^4$ и $E_1^4 \text{---} E_4^4$ в область пятикомпонентного состава. Они также возникают в результате

замыкания полей моновариантными кривыми, проходящими между невариантными точками общей системы.

Построение диаграмм фазового равновесия МКС методом трансляции включает следующие ключевые этапы:

- определение невариантных точек (НТ) общей системы путем сочетания НТ частичных (разнородных) систем;
- определение НТ общей системы в случае односторонней трансляции частичных систем;
- предварительное изображение фазовой диаграммы системы (первая аппроксимация);
- проверка трансляции моновариантных кривых частичных систем в область общего состава;
- поиск возможных «промежуточных» НТ, которые обеспечивают трансляцию МК частичных систем в область общего состава;
- построение диаграммы фазового комплекса МКС (вторая аппроксимация);
- проверка необходимости трансляции НТ частичных систем в область общего состава более чем в одном направлении;
- проверка участия НТ общей системы в замыкании геометрических фигур и отбор лишних точек;
- проверка участия МК общей системы в замыкании геометрических фигур и отбор лишних кривых;
- проверка наличия дивариантных полей, которые замыкаются поверхностями с моновариантными кривыми, проходящими между НТ общей системы;
- построение диаграммы фазового комплекса МКС в окончательном варианте.

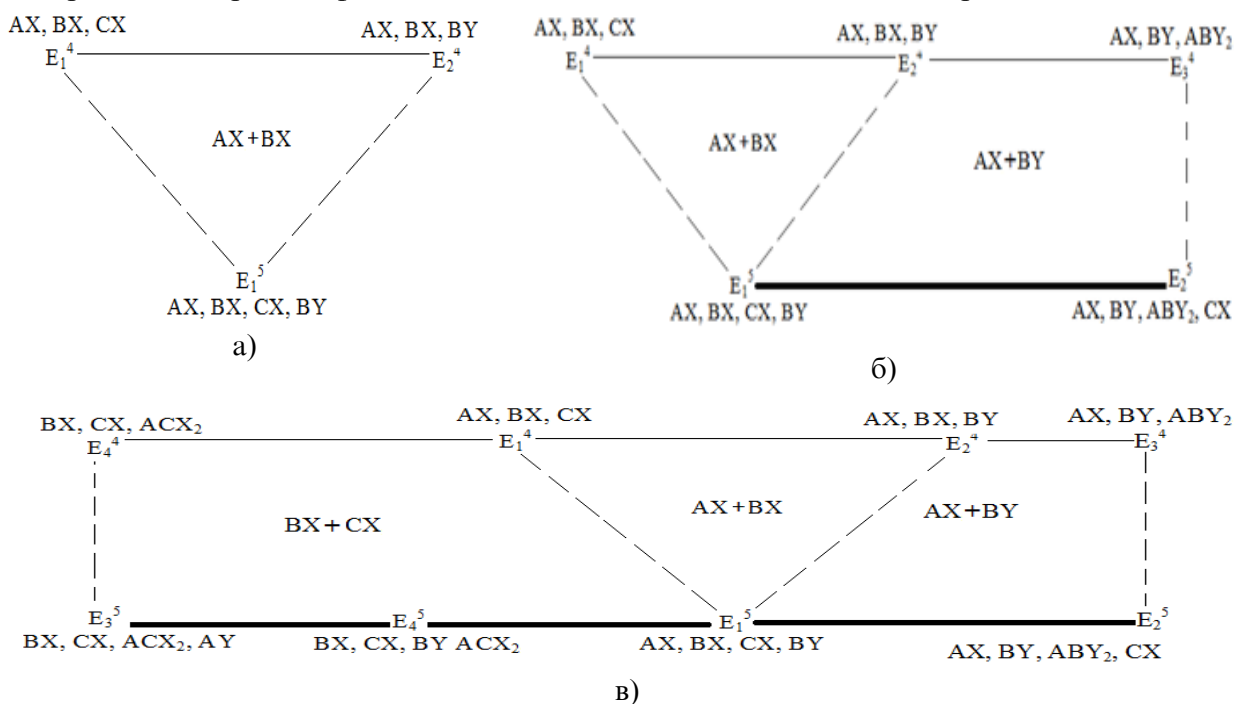


Рисунок 4. – Трансляция геометрических форм фрагмента системы $A, B, C \parallel X, Y - H_2O$
а) сквозная; б) односторонняя; в) промежуточная

Необходимо подчеркнуть, что при построении диаграмм фазового комплекса МКС не всегда требуется выполнение всех вышеупомянутых этапов. Например, если все невариантные точки частичных систем транслируются в область общего состава с помощью двусторонней трансляции, то отпадает необходимость в проведении односторонней трансляции; возможно, что все моновариантные кривые частичных систем транслируются и замыкаются в области общего состава с помощью двусторонней и односторонней трансляции. В этом случае, отпадает необходимость в поиске промежуточных невариантных точек, и так далее.

Политерма диаграммы фазового комплекса пятикомпонентной системы $Na^+, Ca^{2+} \parallel SO_4^{2-}, CO_3^{2-}, HCO_3^- - H_2O$. В водных растворах исследуемой системы присутствуют катионы

Na^+ , Ca^{2+} и анионы SO_4^{2-} , CO_3^{2-} , HCO_3^- , то есть 5 ионов. Следовательно, это пятикомпонентная система. Исследуемая пятикомпонентная система включает 5 четырёхкомпонентных подсистем: $4\text{Na}^+ - \text{SO}_4^{2-} - \text{CO}_3^{2-} - \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$; $3\text{Ca}^{2+} - \text{SO}_4^{2-} - \text{CO}_3^{2-} - 2\text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$; Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, $\text{CO}_3^{2-} - \text{H}_2\text{O}$; Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, $\text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$; Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{CO}_3^{2-}$, $\text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$. Первые две системы включают соли с общим ионом (без реакций обмена). Для них количество составляющих (3 соли и вода) может быть принято за компоненты. В трёх остальных системах протекают реакции обмена.

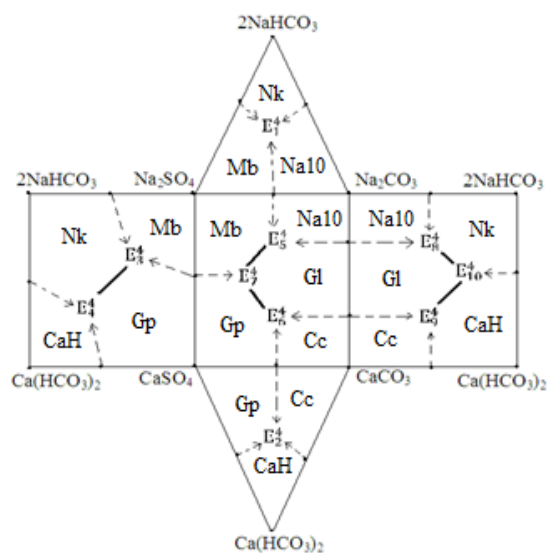
Метод трансляции, разработанный профессором Лутфулло Солиевым (одним из основоположников основ физико-химического анализа и основателем научной школы по изучению МКС методом трансляции), показал, что система Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, CO_3^{2-} , $\text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$ на уровне четырёхкомпонентного состава характеризуется невариантными точками (НТ) со следующими фазовыми составами осадков (табл. 2):

Таблица 2. – Четверные невариантные точки системы Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, CO_3^{2-} , $\text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$ в интервале температур $0 \div 100^\circ\text{C}$

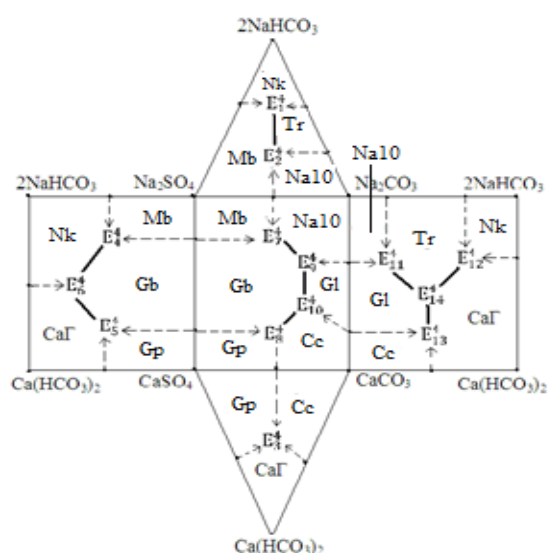
Изотерма, $^\circ\text{C}$	Нонвариантные точки	Равновесные твёрдые фазы	Нонвариантные точки	Равновесные твёрдые фазы
1	2	3	4	5
0	E_1^4	$\text{Mb} + \text{Na10} + \text{Nk}$	E_2^4	$\text{Gp} + \text{CaH} + \text{Cc}$
	E_3^4	$\text{Mb} + \text{Nk} + \text{Gp}$	E_4^4	$\text{Nk} + \text{Gp} + \text{CaH}$
	E_5^4	$\text{Na10} + \text{Mb} + \text{Gl}$	E_6^4	$\text{Cc} + \text{Gp} + \text{Gl}$
	E_7^4	$\text{Mb} + \text{Gl} + \text{Gp}$	E_8^4	$\text{Na10} + \text{Gl} + \text{Nk}$
	E_9^4	$\text{Gl} + \text{Cc} + \text{CaH}$	E_{10}^4	$\text{Gl} + \text{Nk} + \text{CaH}$
25	E_1^4	$\text{Nk} + \text{Mb} + \text{Tr}$	E_2^4	$\text{Mb} + \text{Tr} + \text{Na10}$
	E_3^4	$\text{Gp} + \text{CaG} + \text{Cc}$	E_4^4	$\text{Nk} + \text{Mb} + \text{Gb}$
	E_5^4	$\text{CaH} + \text{Gb} + \text{Gp}$	E_6^4	$\text{Gb} + \text{Nk} + \text{CaH}$
	E_7^4	$\text{Mb} + \text{Na10} + \text{Gb}$	E_8^4	$\text{Gb} + \text{Gb} + \text{Cc}$
	E_9^4	$\text{Gb} + \text{Na10} + \text{Gl}$	E_{10}^4	$\text{Gl} + \text{Gb} + \text{Cc}$
	E_{11}^4	$\text{Na10} + \text{Tr} + \text{Gl}$	E_{12}^4	$\text{Tr} + \text{Nk} + \text{CaH}$
	E_{13}^4	$\text{Cc} + \text{Gl} + \text{CaH}$	E_{14}^4	$\text{Tr} + \text{CaH} + \text{Gl}$
50	E_1^4	$\text{Te} + \text{Nk} + \text{Br}$	E_2^4	$\text{Br} + \text{Tr} + \text{Na1}$
	E_3^4	$\text{Nk} + \text{Br} + \text{Tr}$	E_4^4	$\text{CaH} + \text{Gp} + \text{Cc}$
	E_5^4	$\text{CaH} + \text{Nk} + \text{Te}$	E_6^4	$\text{CaH} + \text{Gb} + \text{Gp}$
	E_7^4	$\text{CaH} + \text{Gb} + \text{Te}$	E_8^4	$\text{Gb} + \text{Te} + \text{Br}$
	E_9^4	$\text{Gp} + \text{Gb} + \text{Cc}$	E_{10}^4	$\text{Br} + \text{Na1} + \text{Pr}$
	E_{11}^4	$\text{Cc} + \text{Gb} + \text{Pr}$	E_{12}^4	$\text{Gb} + \text{Pr} + \text{Cc}$
	E_{13}^4	$\text{Na1} + \text{Pr} + \text{Tr}$	E_{14}^4	$\text{Cc} + \text{Pr} + \text{CaH}$
	E_{15}^4	$\text{Tr} + \text{Nk} + \text{CaH}$	E_{16}^4	$\text{Pr} + \text{Tr} + \text{CaH}$
75	E_1^4	$\text{Te} + \text{Nk} + \text{Br}$	E_2^4	$\text{Na1} + \text{Tr} + \text{Br}$
	E_3^4	$\text{Nk} + \text{Tr} + \text{Br}$	E_4^4	$\text{Gp} + \text{Cc} + \text{CaH}$
	E_5^4	$\text{Nk} + \text{Te} + \text{Gb}$	E_6^4	$\text{CaH} + 5\text{Ca} \cdot \text{Na} \cdot 3 + \text{Gp}$
	E_7^4	$\text{Nk} + \text{CaH} + \text{Gb}$	E_8^4	$\text{CaH} + \text{Gb} + 5\text{Ca} \cdot \text{Na} \cdot 3$
	E_9^4	$\text{Te} + \text{Br} + \text{Gb}$	E_{10}^4	$\text{Na1} + \text{Br} + \text{Pr}$
	E_{11}^4	$\text{Gb} + \text{Cc} + 5\text{Ca} \cdot \text{Na} \cdot 3$	E_{12}^4	$5\text{Ca} \cdot \text{Na} \cdot 3 + \text{Gb} + \text{Br}$
	E_{13}^4	$5\text{Ca} \cdot \text{Na} \cdot 3 + \text{Pr} + \text{Cc}$	E_{14}^4	$\text{Br} + \text{Pr} + 5\text{Ca} \cdot \text{Na} \cdot 3$
	E_{15}^4	$\text{Na1} + \text{Tr} + \text{Pr}$	E_{16}^4	$\text{Tr} + \text{Nk} + \text{CaH}$
	E_{17}^4	$\text{Pr} + \text{CaH} + \text{Cc}$	E_{18}^4	$\text{Tr} + \text{Pr} + \text{CaH}$
100	E_1^4	$\text{Te} + \text{Nk} + 3\text{Na} \cdot \text{C}$	E_2^4	$\text{Br} + \text{Tr} + \text{Na1}$

	Конец таблицы 2			
	2	3	4	5
	E_3^4	Te + Br + Tr	E_4^4	Te + Tr + 3Na·C
	E_5^4	CaH + Gp + Cc	E_6^4	Nk + Te + Gb
	E_7^4	CaH + Gb + Gp	E_8^4	CaH + Gb + Nk
	E_9^4	Gb + Te + Br	E_{10}^4	Br + Pr + Na1
	E_{11}^4	Gp + Gb + Cc	E_{12}^4	Cc + Gb + Pr
	E_{13}^4	Gb + Pr + Br	E_{14}^4	Na1 + Pr + Tr
	E_{15}^4	Cc + Pr + CaH	E_{16}^4	3Na·C + Nk + CaH
	E_{17}^4	Pr + Tr + 3Na·C	E_{18}^4	Pr + 3Na·C + CaH

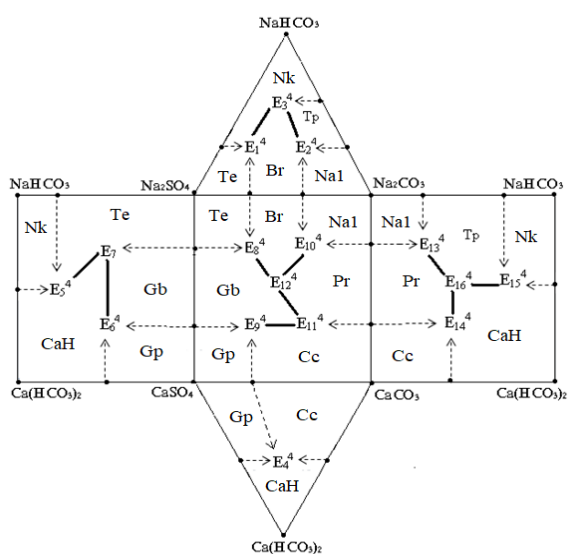
Как видно из таблицы 2, количество невариантных точек на разных изотермах различается. Это зависит от типа системы и свойств её составных компонентов. На основе данных таблицы 2 был построен уровень четырёхкомпонентного состава открытой призмы диаграммы фазового комплекса системы, включающей катионы натрия, кальция и анионы сульфата, карбоната, гидрокарбоната. Этот уровень представлен на рис. 5. В открытой призме геометрические формы солевой части исследуемой системы они нашли свое выражение.



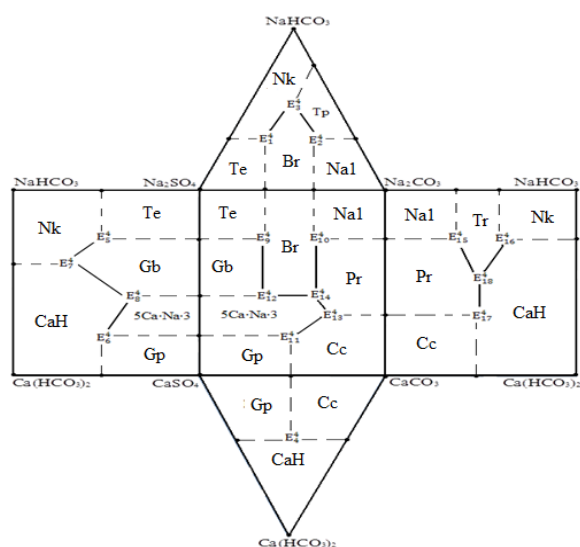
а)



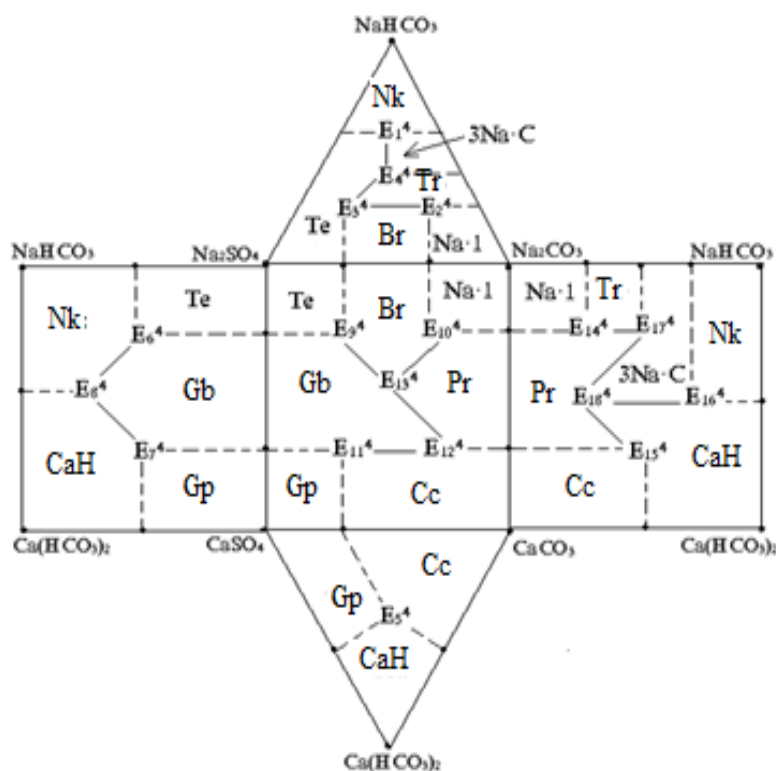
б)



В)



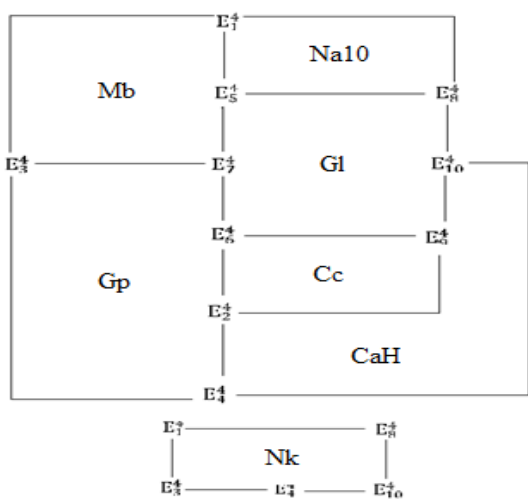
Г)



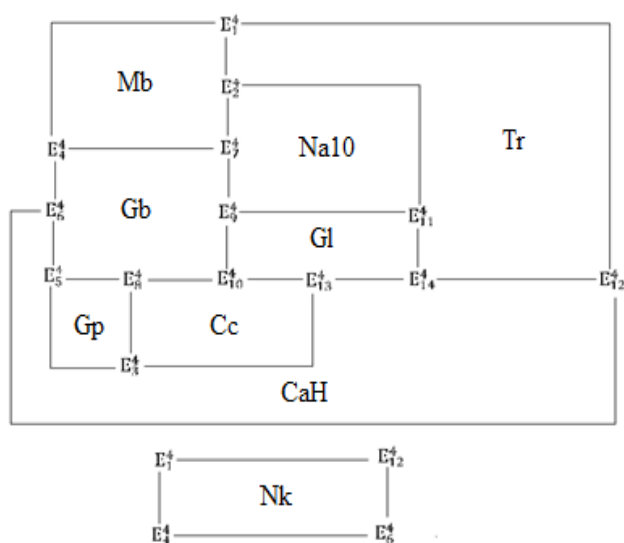
д)

Рисунок 5. – Изоثرмы открытой четверной призмы системы $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+} \parallel \text{CO}_3^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$: а) 0 °C; б) 25 °C; в) 50 °C; г) 75 °C; д) 100 °C

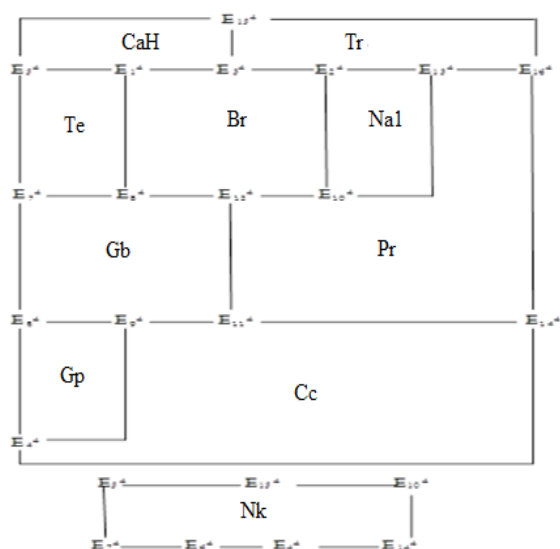
На рисунке, представленном выше, дана диаграмма исследованной системы при различных пяти температурах. Можно эти диаграммы упростить. Например, объединить однородные поля кристаллизации равновесных твёрдых фаз. Это позволит представить диаграмму в унифицированном (сводном) виде (рис. 6). Предложенные диаграммы включают всю информацию, полученную в ходе исследований. Сохраняются состав равновесных твёрдых фаз, все геометрические изображения, их взаимное расположение. При изучении поликомпонентных систем методом трансляции унифицированные диаграммы будут неотъемлемой частью (основой) исследования. Таким образом, будет реализован принцип соответствия структурных изображений частичных и общих систем на одной диаграмме.



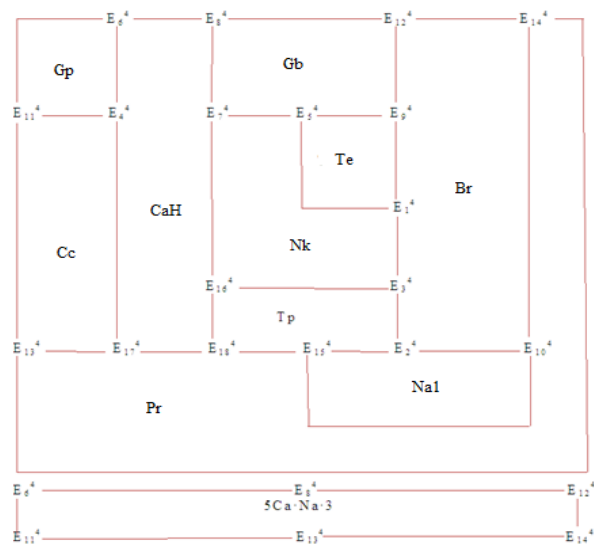
а)



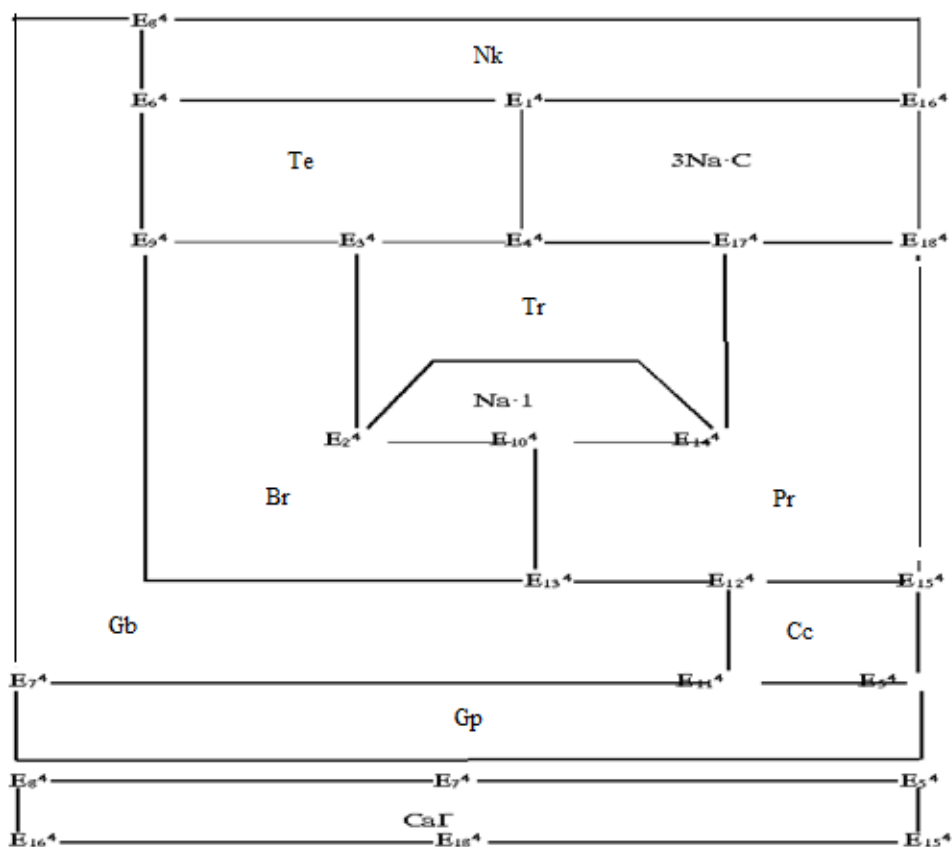
б)



в)



г)



д)

Рисунок 6. – Унифицированная форма диаграммы уровня четырехкомпонентного состава системы $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+} \parallel \text{CO}_3^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$: а) 0 °C; б) 25 °C; в) 50 °C; г) 75 °C; д) 100 °C

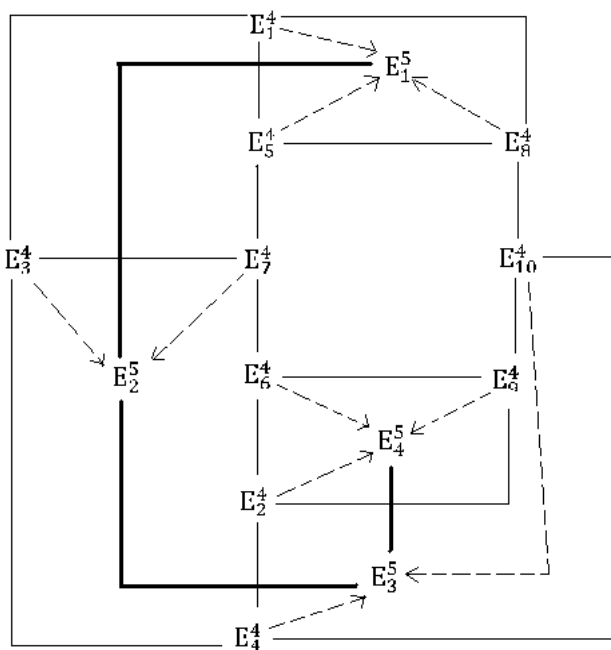
На основе таблицы 2 установлено, что в пятикомпонентной системе $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}, \text{CO}_3^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$ на политерме уровня четырехкомпонентного состава присутствует 76 неинвариантных точек.

Применение методов трансляции: «трёхсторонней», «сквозной» и «промежуточной» показало, что на уровне пятикомпонентного состава они образуют следующие неинвариантные точки, способ формирования которых представлен в таблице 3.

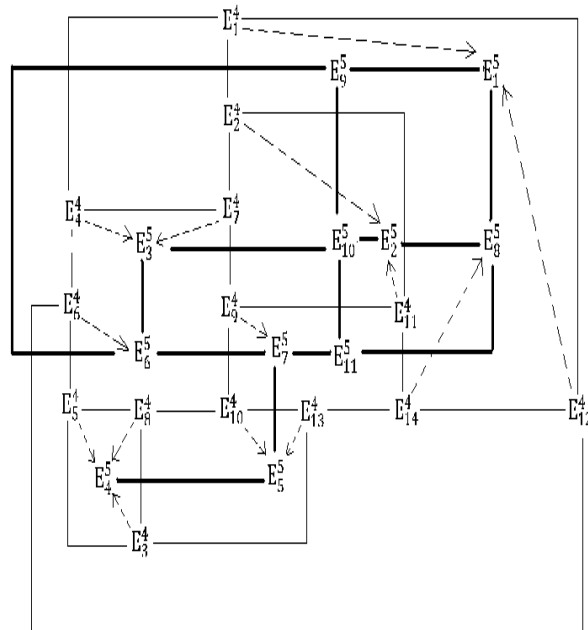
Таблица 3. – Трансляция частичных невариантных точек на общий (пятерный) уровень политермы системы $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}, \text{CO}_3^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$.

Геометрические трансляционные формы	Формирующиеся невариантные точки	Равновесные твёрдые фазы	Вид трансляции
Изотерма 0 °C			
E_1^4, E_5^4, E_8^4	E_1^5	$\text{Nk} + \text{Mb} + \text{Na10} + \text{Gl}$	Трёхсторонняя
E_3^4, E_7^4	E_2^5	$\text{Nk} + \text{Mb} + \text{Gp} + \text{Gl}$	Сквозная
E_4^4, E_{10}^4	E_3^5	$\text{Nk} + \text{cah} + \text{Gp} + \text{Gl}$	Сквозная
E_6^4, E_2^4, E_9^4	E_4^5	$\text{Gp} + \text{Cc} + \text{cag} + \text{Gl}$	Трёхсторонняя
Изотерма 25 °C			
E_1^4, E_{12}^4	E_1^5	$\text{Mb} + \text{Nk} + \text{Tr} + \text{cah}$	Сквозная
E_2^4, E_{11}^4	E_2^5	$\text{Mb} + \text{Tr} + \text{Na10} + \text{Gl}$	Сквозная
E_4^4, E_7^4	E_3^5	$\text{Gb} + \text{Mb} + \text{Nk} + \text{Na10}$	Сквозная
E_3^4, E_5^4, E_8^4	E_4^5	$\text{Gp} + \text{Gb} + \text{cah} + \text{Cc}$	Сквозная
E_{10}^4, E_{13}^4	E_5^5	$\text{Gb} + \text{Gl} + \text{Cc} + \text{cah}$	Сквозная
$E_6^4, \text{Na10}$	E_6^5	$\text{Gb} + \text{Nk} + \text{cah} + \text{Na10}$	Односторонняя
E_9^4, cah	E_7^5	$\text{Gb} + \text{Gl} + \text{Na10} + \text{cah}$	Односторонняя
E_{14}^4, Mb	E_8^5	$\text{Gl} + \text{Tr} + \text{cah} + \text{Mb}$	Односторонняя
	E_9^5	$\text{Mb} + \text{Nk} + \text{cah} + \text{Na10}$	Промежуточная
	E_{10}^5	$\text{Na10} + \text{Gl} + \text{Mb} + \text{Nk}$	Промежуточная
	E_{11}^5	$\text{Gl} + \text{Na10} + \text{cah} + \text{Mb}$	Промежуточная
Изотерма 50 °C			
E_1^4, E_5^4	E_1^5	$\text{Te} + \text{Nk} + \text{Br} + \text{cah}$	Сквозная
$E_2^4, E_{10}^4, E_{13}^4$	E_2^5	$\text{Br} + \text{Na1} + \text{Tr} + \text{Pr}$	Трёхсторонняя
E_3^4, E_{15}^4	E_3^5	$\text{Nk} + \text{Tr} + \text{Br} + \text{cah}$	Сквозная
E_4^4, E_6^4, E_9^4	E_4^5	$\text{Gp} + \text{Cc} + \text{cah} + \text{Gb}$	Трёхсторонняя
E_7^4, E_8^4	E_5^5	$\text{Cah} + \text{Te} + \text{Gb} + \text{Br}$	Сквозная
E_{11}^4, E_{14}^4	E_6^5	$\text{Cc} + \text{Gb} + \text{Pr} + \text{cah}$	Сквозная
E_{12}^4, cah	E_7^5	$\text{Pr} + \text{Gb} + \text{Br} + \text{cah}$	Односторонняя
E_{16}^4, Br	E_8^5	$\text{Tr} + \text{Pr} + \text{cah} + \text{Br}$	Односторонняя
Изотерма 75 °C			
E_1^4, E_5^4, E_9^4	E_1^5	$\text{Te} + \text{Nk} + \text{Br} + \text{Gb}$	Трёхсторонняя
$E_2^4, E_{10}^4, E_{15}^4$	E_2^5	$\text{Na1} + \text{Tr} + \text{Br} + \text{Pr}$	Трёхсторонняя
E_4^4, E_6^4, E_{11}^4	E_3^5	$\text{Gp} + \text{cah} + \text{Cc} + 5\text{Ca} \cdot \text{Na} \cdot 3$	Трёхсторонняя
E_7^4, E_{16}^4	E_4^5	$\text{Tr} + \text{Nk} + \text{Br} + \text{cah}$	Сквозная
E_8^4, E_{12}^4	E_5^5	$\text{Cah} + \text{Gb} + 5\text{Ca} \cdot \text{Na} \cdot 3 + \text{Br}$	Сквозная
E_{13}^4, E_{17}^4	E_6^5	$\text{Pr} + \text{cah} + 5\text{Ca} \cdot \text{Na} \cdot 3 + \text{Cc}$	Сквозная
$E_3^4, 5\text{Ca} \cdot \text{Na} \cdot 3$	E_7^5	$\text{Nk} + \text{Tr} + 5\text{Ca} \cdot \text{Na} \cdot 3 + \text{Br}$	Односторонняя
E_{14}^4, Tr	E_8^5	$\text{Br} + \text{Pr} + 5\text{Ca} \cdot \text{Na} \cdot 3 + \text{Tr}$	Односторонняя
E_{18}^4, Br	E_9^5	$\text{Tr} + \text{Pr} + \text{cah} + \text{Br}$	Односторонняя
Изотерма 100 °C			
E_1^4, E_6^4	E_1^5	$\text{Nk} + \text{Te} + 3\text{Na} \cdot \text{C} + \text{Gb}$	Сквозная
$E_2^4, E_{10}^4, E_{14}^4$	E_2^5	$\text{Br} + \text{Tr} + \text{Na} \cdot 1 + \text{Pr}$	Трёхсторонняя
E_3^4, E_9^4	E_3^5	$\text{Br} + \text{Te} + \text{Tr} + \text{Gb}$	Сквозная
E_4^4, E_{17}^4	E_4^5	$3\text{Na} \cdot \text{C} + \text{Te} + \text{Tr} + \text{Pr}$	Сквозная
E_5^4, E_7^4, E_{11}^4	E_5^5	$\text{Gp} + \text{Cc} + \text{cah} + \text{Gb}$	Трёхсторонняя
E_8^4, E_{16}^4	E_6^5	$\text{Cah} + \text{Nk} + \text{Gb} + 3\text{Na} \cdot \text{C}$	Сквозная
E_{12}^4, E_{15}^4	E_7^5	$\text{Gb} + \text{Pr} + \text{Cc} + \text{cah}$	Сквозная
E_{13}^4, Tr	E_8^5	$\text{Gb} + \text{Br} + \text{Pr} + \text{Tr}$	Односторонняя
E_{18}^4, Gb	E_9^5	$\text{Pr} + 3\text{Na} \cdot \text{C} + \text{cah} + \text{Gb}$	Односторонняя
	E_{10}^5	$\text{Te} + 3\text{Na} \cdot \text{C} + \text{Gb} + \text{Pr}$	Промежуточная
	E_{11}^5	$\text{Te} + \text{Tr} + \text{Gb} + \text{Pr}$	Промежуточная

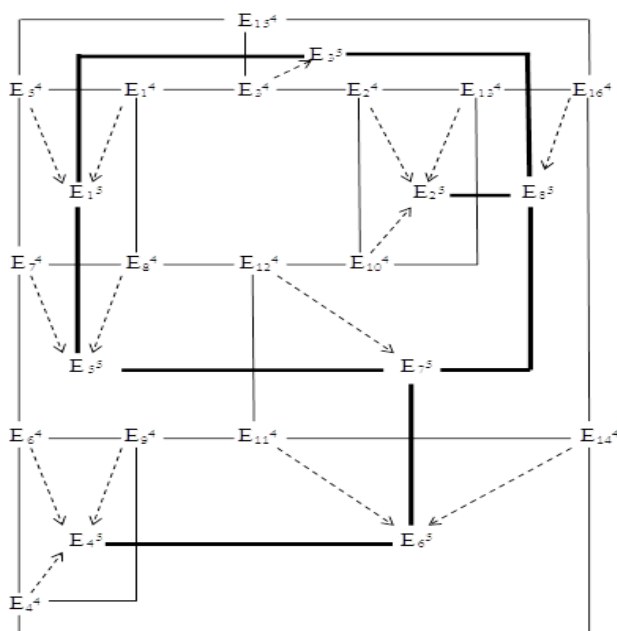
Диаграммы фазового комплекса системы $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}, \text{CO}_3^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$ в интервале температур $0 \div 100^\circ\text{C}$ построенные на основе полученных данных на уровне пятикомпонентного состава, показывают, что: поля кристаллизации, которые не замкнуты при трансляции моновариантных линий уровня четырехкомпонентного состава (с их равновесными твёрдыми фазами), были замкнуты с использованием «промежуточного» типа трансляции пятикомпонентных нонвариантных точек с соответствующими равновесными твёрдыми фазами. Окончательный вариант унифицированных диаграмм фазовых комплексов $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}, \text{CO}_3^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$ на четырёх- и пятикомпонентном уровнях в диапазоне температур $0 \div 100^\circ\text{C}$, учитывающие все типы трансляции, представлены на рис. 7.



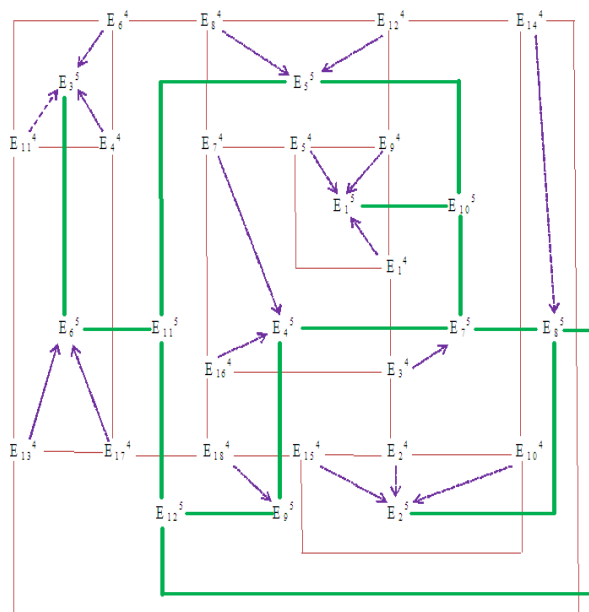
а)



б)



в)



г)



а) 0 ; б) 25 ; в) 50; г) 75 ; д) 100

При использовании метода трансляции для решения практических задач диаграмма фазового комплекса пятикомпонентной системы должна быть фрагментирована по всем областям кристаллизации индивидуальных соединений. Кроме того, следует фрагментацию осуществлять на всех уровнях вариантности системы. Именно так проведена фрагментация изотермы 0°C фазового комплекса системы Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, CO_3^{2-} , HCO_3^- - H_2O (рис. 8) в области парагенезиса одной фазы с другими солями.



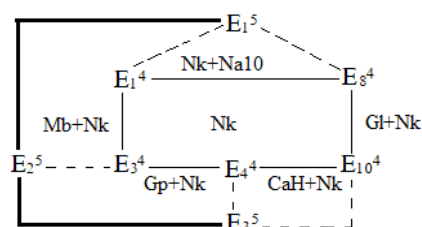


Рисунок 8. – Систем $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}, \text{CO}_3^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$ при 0°C . Фрагментация диаграммы фазового комплекса осуществлена в области парагенезиса одной фазы с другими солями.

Построенные методом трансляции фрагменты диаграммы фазового комплекса позволяют 1) анализировать, 2) прогнозировать процессы кристаллизации солей в многокомпонентных системах. Для этого используются данные по их составам и исходно выделившихся твёрдых фаз.

Политерма растворимости системы $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}, \text{CO}_3^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$ на четырёхкомпонентном уровне

Экспериментальное исследование химических систем требует проведения и анализа данных по растворимости, например, для каждой 10 % концентрации. Такой подход требует не только большого количества химических реактивов, но и значительного времени. Прогнозирование фазового комплекса МКС методом трансляции позволяет сэкономить материалы и продолжительность затрат времени для практических работ. Полученные для химических систем диаграммы позволяют найти возможные концентрационные параметры, а также определить для линий, полей и точек парагенезисы равновесных твёрдых фаз.

Растворимость компонентов в водных химических системах. Вода считается универсальным растворителем. В ней растворяются твёрдые вещества, жидкости и газы. Процесс растворения химических соединений проходит в три стадии (независимо от агрегатного состояния растворяемого вещества): разрыв химических связей в составе растворяемого вещества за счёт силы притяжения молекул воды; образование новых связей между молекулами воды и растворяемым веществом за счёт силы притяжения молекул воды; распространение вновь образованных веществ в водной среде. В таблице 4 приводятся характеристики механических смесей, химических соединений и растворов.

Таблица 4. – Описание характеристик механических смесей, химических соединений и растворов

Свойства	Механическая смесь	Химическое соединение	Раствор
Состав	Не меняющийся	Согласно закону постоянства состава	Не меняющийся
Соотношения компонентов	Различные соотношения	Согласно закону эквивалентов, закону кратных отношений	Широкий диапазон соотношений
Химическая связь	Отсутствует	Устойчивая, энергия связей 70-418,7 кДж/моль	Неустойчивая, энергия связей 20,9-125,6 кДж/моль
Закон сохранения массы и энергии	Соответствует	Соответствует	Соответствует
Свойства составных частей	С сохранением индивидуальных свойств	Исчезает индивидуальное свойство, появляются новые	Исчезает индивидуальное свойство, появляются новые

Механизм растворения твердых кристаллических тел в водной среде обусловлен деструктивным воздействием молекул растворителя на структуру вещества. Вода, выступая в роли активного реагента, вызывает деформацию и последующее разрушение кристаллической решетки, будь то ионная структура солей или молекулярная упаковка простых веществ.

Политермический анализ системы $5\text{Na}^+ \cdot \text{SO}_4^{2-} \cdot \text{CO}_3^{2-} \cdot \text{HCO}_3^- \cdot \text{H}_2\text{O}$. Особый научный и прикладной интерес представляет исследование политермы растворимости шестикомпонентной системы, моделирующей состав жидких отходов регенерации криолита на алюминиевом производстве. Данные промышленные стоки представляют собой сложный комплекс, содержащий фториды, карбонаты, гидрокарбонаты и сульфаты натрия, кальция и алюминия. Закономерности процессов кристаллизации и растворимости солей в указанных водных средах детерминируются принципами фазового равновесия в рамках многокомпонентной системы: Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, CO_3^{2-} , HCO_3^- , F^- - H_2O . Фундаментальную основу описания этой системы составляет анализ составляющих её пяти- и четырехкомпонентных подсистем. Количественные параметры межфазовых переходов позволяют оптимизировать технологические режимы очистки и переработки отходов металлургического цикла.

В температурном интервале 0–100 °С равновесное состояние твердой фазы исследуемой системы характеризуется наличием следующих соединений: мирабилита - $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ (Mb); декагидрата карбоната натрия - $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ (Na10) и NaHCO_3 - нахколита (Nk). Для проведения экспериментальных работ были использованы химические реактивы соответствующей квалификации: $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ - (марки «х.ч.»); Na_2CO_3 - (марки «ч.»); NaHCO_3 - (марки - «ч.»). В ходе исследования были верифицированы параметры растворимости, определяющие топологию геометрических форм системы.

В таблице 5 систематизированы количественные показатели растворимости индивидуальных соединений и составы в невариантных точках. Представленные данные включают как сведения для трехкомпонентных систем, заимствованные из справочной литературы, так и результаты оригинальных исследований авторов для четырехкомпонентных составов.

Таблица 5. – Политерма растворимости системы $5\text{Na}^+ \cdot \text{SO}_4^{2-} \cdot \text{CO}_3^{2-} \cdot \text{HCO}_3^- \cdot \text{H}_2\text{O}$ при 0 °С

№ точки	Состав жидкой фазы, мас.%, мас.%				Равновесные твёрдые фазы
	Na_2SO_4	Na_2CO_3	NaHCO_3	H_2O	
1	2	3	4	5	6
Изотерма 0 °С					
E_1^3	2.73	-	5.58	91.69	Mb + Nk
E_2^3	-	5.60	4.6	89.80	Nk + Na10
E_3^3	2.80	6.00	-	91.20	Na10 + Mb
E_1^4	2.12	5.13	4.37	88.38	Mb + Tr + Na10
Изотерма 25 °С					
E_1^3	16.40	18.30	-	65.30	Mb+Na10
E_2^3	20.68	-	4.16	75.16	Nk+Mb
E_3^3	-	17.62	4.62	77.76	Tr+Nk
E_4^3	-	22.46	2.84	74.70	Na10+Tr
E_1^4	21.20	20.07	5.51	50.22	Mb+Tr+Na10
E_2^4	20.90	22.54	4.77	50.68	Nk+Tr+Mb
Изотерма 50 °С					
E_1^3	29.65	-	4.05	66.30	Te+Nk
E_2^3	22.47	10.52	-	67.61	Te+Br
E_3^3	5.87	28.52	-	65.61	Br+Na1
E_4^3	-	16.92	6.30	76.78	Nk+Tr

Конец таблицы 5					
1	2	3	4	5	6
E_5^3	-	31.80	0.85	67.35	Tr+Na1
E_1^4	12.64	21.31	2.51	54.76	Te+Nk+Br
E_2^4	4.30	24.36	0.64	58.03	Br+Tr+Na1
E_3^4	7.52	9.14	3.24	60.08	Tr+Nk+Br
Изотерма 75 °C					
E_1^3	25.00	6.40	-	88.20	Te+Br
E_2^3	3.80	28.90	-	67.30	Br+ Na1
E_3^3	7.90	-	12.72	79.38	Te+Nk
E_4^3	-	17.01	9.05	73.94	Tr+Nk
E_5^3	-	30.40	10.91	58.69	Na1+Tr
E_1^4	17.40	6.08	10.23	66.29	Te+Nk+Br
E_2^4	20.13	16.28	11.54	52.05	Na1+Br+Tr
E_3^4	20.28	15.72	13.45	50.55	Br+Tr+Nk

Опираясь на экспериментальные данные, приведенные в таблице 5, нами было выполнено построение изотермических сечений диаграммы фазового равновесия (растворимости) четырехкомпонентной системы $5\text{Na}^+ - \text{SO}_4^{2-} - \text{CO}_3^{2-} - \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$. Безводная проекция данной диаграммы представлена для наглядной интерпретации на рисунке 9.

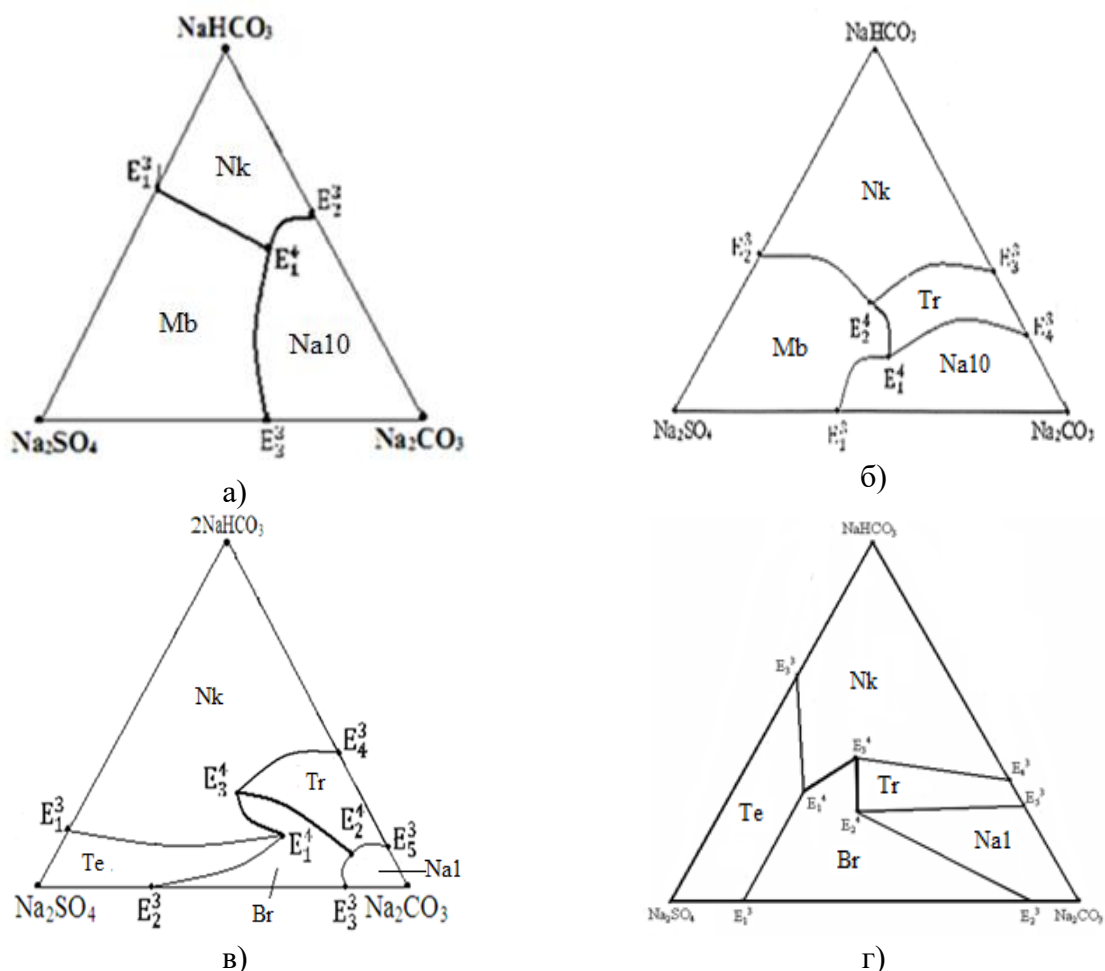


Рисунок 9. – Политермическое сечение безводной проекции диаграммы состояния системы $5\text{Na}^+ - \text{SO}_4^{2-} - \text{CO}_3^{2-} - \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$: а) 0 °C; б) 25 °C; в) 50 °C; д) 75 °C

На основании анализа диаграмм, представленных на рис. 9, установлено, что термическая активация системы не только способствует интенсификации процессов

растворения, но и инициирует фазовый генезис - образование новых твердых соединений. Данное явление обуславливает существенное усложнение геометрической структуры фазовой диаграммы. В частности, при переходе от изотермы 0 °С к 25 °С в системе фиксируется появление метастабильной или равновесной фазы троны. Дальнейшее повышение температуры в интервале от 25 °С до 50 °С сопровождается формированием новой твердой фазы - беркеита (двойной соли сульфата и карбоната натрия).

Политерма растворимости системы $3\text{Ca}^{2+}\text{-SO}_4^{2-}\text{-CO}_3^{2-}\text{-2HCO}_3^-\text{-H}_2\text{O}$.

Конститутивные (составные) компоненты данной четырехкомпонентной системы представлены сульфатом, карбонатом и гидрокарбонатом кальция. При температурах 0, 25, 50 и 75 °С они кристаллизуются в виде следующих фаз: $\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (Gr), CaCO_3 (Cc) и $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ (CaH). Для проведения экспериментальных исследований были использованы следующие марки химических реактивов: $\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ «х.ч.»; CaCO_3 «ч.»; $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ «ч.».

В таблице 6 обобщены данные, полученные в результате наших исследований, касающихся растворимости индивидуальных соединений в нонвариантных тройных точках изученной системы. Экспериментальные данные получены в областях трехкомпонентного и четырехкомпонентного составов.

Таблица 6. – Политермические данные по растворимости в системе $3\text{Ca}^{2+}\text{-SO}_4^{2-}\text{-CO}_3^{2-}\text{-2HCO}_3^-\text{-H}_2\text{O}$

№ точки	Состав жидкой фазы, мас.%, мас.%				Равновесная твёрдая фаза
	CaSO_4	CaCO_3	$\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$	H_2O	
1	2	3	4	5	6
Изотерма 0 °С					
e ₁	0.1760	-	-	99.8240	Gr
e ₂	-	0.0031	-	99.9960	Cc
e ₃	-	-	0.1440	99.8560	CaH
E ₁ ³	0.0217	0.0014	-	99.9640	Gr+Cc
E ₂ ³	-	0.0014	0.0830	99.9000	Cc+CaH
E ₃ ³	0.0217	-	0.0830	99.9850	CaH+Gr
E ₁ ⁴	0.0217	0.0014	0.0830	99.8800	Cc+CaH+Gr
Изотерма 25 °С					
e ₁	0.2130	-	-	99.7870	Gr
e ₂	-	0.0056	-	99.9940	Cc
e ₃	-	-	0.0160	99.9840	CaH
E ₁ ³	0.1750	0.0038	-	99.8210	Gr+Cc
E ₂ ³	0.1860	-	0.0168	99.7970	Gr+CaH
E ₃ ³	-	0.0046	0.0179	99.9770	Cc+CaH
E ₁ ⁴	0.2180	0.00535	0.0225	99.7540	Gr+Cc+CaH
Изотерма 50 °С					
e ₁	0.2100	-	-	99.7900	Gr
e ₂	-	0.0054	-	99.9946	Cc
e ₃	-	-	0.0145	99.9855	CaH
E ₁ ³	0.1070	0.0042	-	99.8888	Gr+Cc
E ₂ ³	-	0.0047	0.0125	99.9828	Cc+CaH
E ₃ ³	0.2580	-	0.0135	99.7285	CaH+Gr
E ₁ ⁴	0.1940	0.0063	0.0210	99.7787	Cc+CaH+Gr
Изотерма 75 °С					
e ₁	0.3120	-	-	99.6880	Gr
e ₂	-	0.0076	-	99.9924	Cc

Конец таблицы 6					
1	2	3	4	5	6
e_3	-	-	0.0145	99.9855	CaG
E_1^3	0.1284	0.0053	-	99.8663	Gp+Cc
E_2^3	-	0.0059	0.0115	99.9826	Cc+CaG
E_3^3	0.3350	-	0.0128	99.6522	CaG+Gp
E_1^4	0.2710	0.0082	0.0207	99.7208	Cc+Gp+CaG

На основе данных, зафиксированных в таблице 6, нами была осуществлена конструкция (реализовано построение) диаграммы растворимости четырехкомпонентной системы $3Ca^{2+}-SO_4^{2-}-CO_3^{2-}-2HCO_3^{-}-H_2O$ в температурном интервале $0 - 75\text{ }^{\circ}\text{C}$. Указанная политермическая диаграмма представлена на рисунке 10 в виде изотермических сечений при следующих температурах.

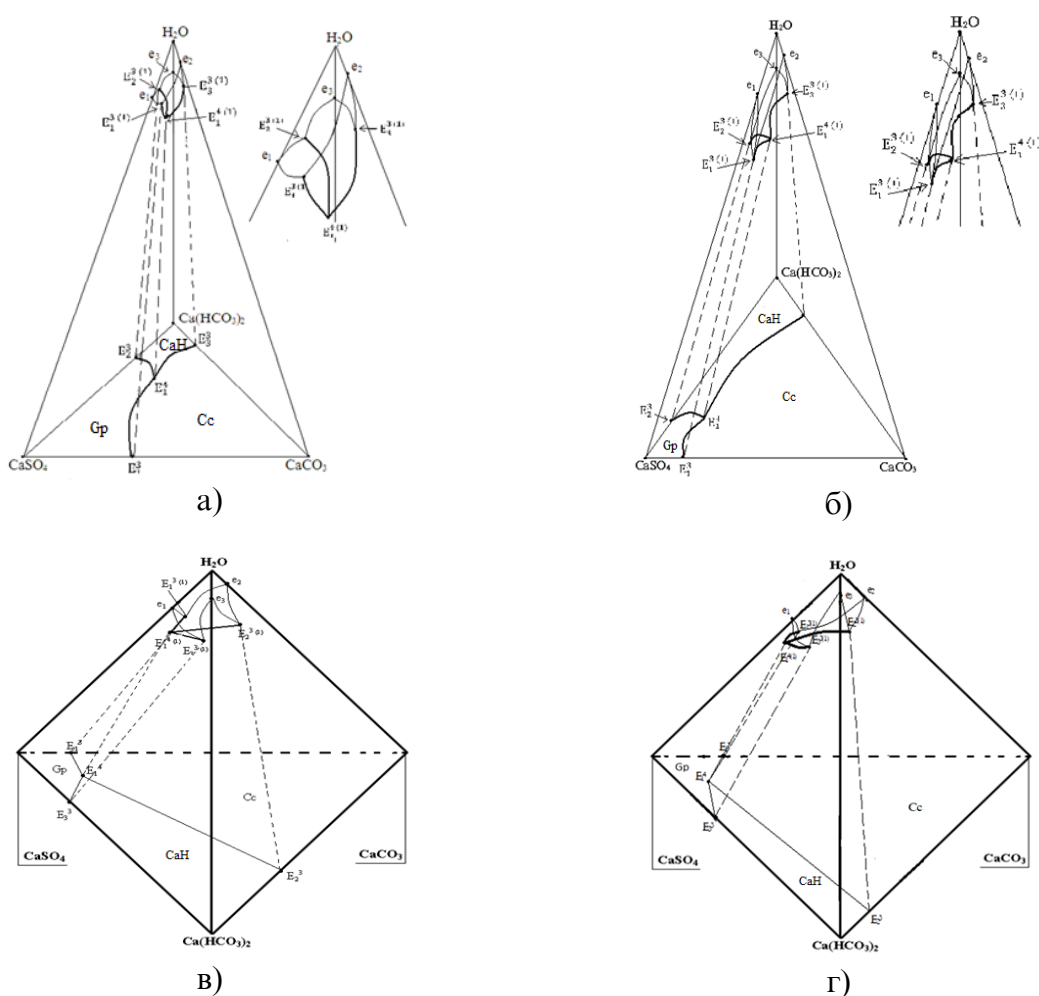


Рисунок 10. – Политермическая диаграмма растворимости системы $3Ca^{2+}-SO_4^{2-}-CO_3^{2-}-2HCO_3^{-}-H_2O$: а) $0\text{ }^{\circ}\text{C}$; б) $25\text{ }^{\circ}\text{C}$; в) $50\text{ }^{\circ}\text{C}$; г) $75\text{ }^{\circ}\text{C}$

В соответствии с принципом Фашанга (правилом аддитивности Фашанга), стороны треугольной проекции соответствуют трем водным трехкомпонентным системам. Эти системы включают: сульфат кальция – карбонат кальция; сульфат кальция – гидрокарбонат кальция; карбонат кальция – гидрокарбонат кальция. Указанные системы позиционированы на диаграмме следующим образом: $CaSO_4-CaCO_3-H_2O$ занимает нижнюю часть; $CaSO_4-$

$\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ расположен в левой части; CaCO_3 - $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ простирается от нижнего края до верхней части (правая сторона) диаграммы.

Каждый индивидуальный компонент с растворителем представлен на координатной оси моновариантной концентрационной линией. Остальные координаты геометрической формы (точки невариантного равновесия и линии моновариантного равновесия) были детерминированы (определены) на основе данных по растворимости с применением метода масс-центра (центроида). Анализ рис. 10 показывает, что площадь кристаллизации карбоната кальция Сс (CaCO_3) в изученной четырехкомпонентной системе занимает большую часть диаграммы. Причина – низкая растворимость карбоната кальция в заданных условиях.

С помощью кристаллооптического метода контролировалось достижение равновесия в системе. При контроле осуществлялось визуальное наблюдение фаз твердого осадка. Для этого использовался микроскоп с последующим фотографированием.

На рисунке 11 представлены микрофотографии индивидуальных и смешанных твердых фаз, находящихся в равновесии, которые были отобраны как на моновариантных линиях исследуемой системы, так и в трехфазных (трехкомпонентных) невариантных точках полного состава системы.

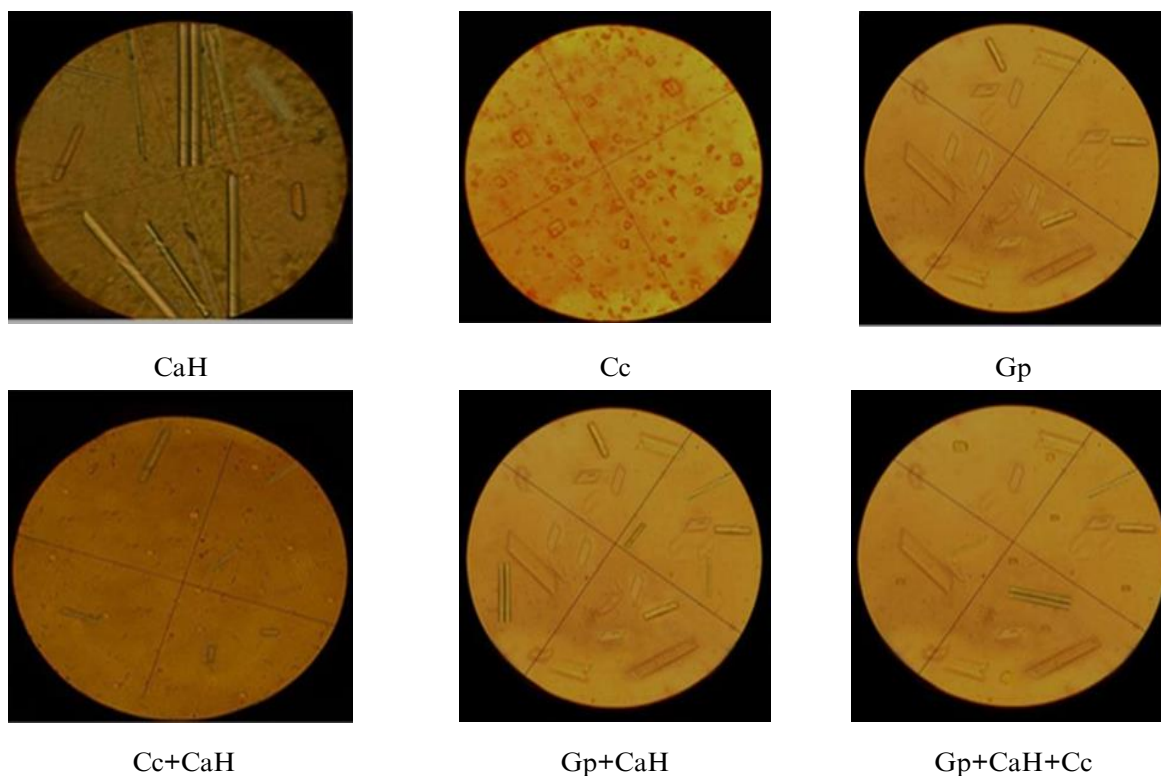


Рисунок 11. – Политермическая серия микрофотографий равновесных твердых фаз системы 3Ca^{2+} - SO_4^{2-} - CO_3^{2-} - 2HCO_3^- - H_2O

Политерма растворимости в системе Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, CO_3^{2-} - H_2O . Равновесные твердые фазы исследуемой системы в температурном диапазоне $0 \div 100^\circ\text{C}$ включают следующие соединения: $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ – мирабилит (Mb); $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ – гипс (Gr); CaCO_3 – кальцит (Cc); $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{CaCO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ – гейлюссит (Gl); $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot \text{CaSO}_4$ – глауберит (Gb); Na_2SO_4 – тенардит (Te); $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{CaCO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ – пирсонит (Pr); $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ – термонатрит (Na1); $5\text{CaSO}_4 \cdot \text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O} - 5\text{C} \cdot \text{Na} \cdot 3$.

Получены сведения о растворимости индивидуальных компонентов в точках, лежащих на границе пятикомпонентной системы в рамках трехкомпонентного четырехкомпонентного составов (табл. 7).

Таблица 7. – Система Na^+ , $\text{Ca}^{2+}||\text{SO}_4^{2-}$, CO_3^{2-} - H_2O и её политермические данные по растворимости

№ точки	Состав жидкой фазы, мас.%					Равновесная твёрдая фаза
	Na_2SO_4	CaSO_4	Na_2CO_3	CaCO_3	H_2O	
1	2	3	4	5	6	7
Изотерма 0 °C						
E_1^3	4.340	0.1960	-	-	95.460	Mb+Gp
E_2^3	-	-	12.00	0.0048	87.990	Na10+Gl
E_3^3	-	-	4.300	0.0048	95.690	Gl+Cc
E_4^3	2.8000	-	6.010	-	91.190	Mb+Na10
E_5^3	-	0.2000	-	0.0045	99.795	Gp+Cc
E_1^4	1.9670	0.2440	1.551	-	96.238	Mb+Na10+Gp
E_2^4	-	0.2720	11.300	0.00465	88.420	Na10+Gp+Gl
E_3^4	-	0.3400	18.300	0.0125	81.347	Gp+Gl+Cc
Изотерма 25 °C						
E_1^3	21.7500	0.1970	-	-	78.050	Mb+Gb
E_2^3	25.7800	0.1880	-	-	74.032	Gp+Gb
E_3^3	16.4000	-	18.400	-	65.300	Mb+Na10
E_4^3	-	-	5.6500	0.0035	94.3465	Na10+Gl
E_5^3	-	-	4.5000	0.0024	95.4976	Gl+Cc
E_6^3	-	0.2130	-	0.0048	99.7822	Gp+Cc
E_1^4	14.2000	0.2730	19.6000	-	65.927	Mb+Na10+Gb
E_2^4	-	0.4080	18.5500	0.0055	81.0365	Gp+Gb+Cc
E_3^4	12.5200	-	19.4500	0.0052	68.0248	Na10+Gl+Gb
E_4^4	-	0.3280	20.7000	0.0043	78.9677	Cc+Gb+Gl
Изотерма 50 °C						
E_1^3	22.4700	—	10.520	—	67.010	Te+Br
E_2^3	5.8700	—	28.520	—	65.610	Br+Na1
E_3^3	—	0.1070	—	0.0042	99.8888	Gp+Cc
E_4^3	3.3000	0.1660	—	—	96.534	Te+Gb
E_5^3	3.8800	0.2740	—	—	95.846	Gb+Gp
E_6^3	—	—	24.7800	0.0039	75.2161	Na1+Pr
E_7^3	—	—	20.9300	0.0041	79.0659	Pr+Cc
E_1^4	1.5210	0.148	3.7430	—	94.588	Te+Br+Gb
E_2^4	3.7190	—	13.980	0.00375	82.2970	Na1+Br+Pr
E_3^4	8.9230	0.1620	—	0.0047	90.9100	Gp+Cc+Gb
E_4^4	—	0.1360	2.7700	0.0046	97.0894	Cc+Pr+Gb
E_5^4	6.1700	—	9.0100	0.0063	84.8137	Gb+Br+Pr
Изотерма 75 °C						
E_1^3	25.00	—	6.400	—	68.6000	Te+Br
E_2^3	3.800	—	28.900	—	67.3000	Br+Na1
E_3^3	4.600	0.5220	—	—	94.8780	Te+Gb
E_4^3	5.840	0.8880	—	—	93.2720	Gb+5CaNa3
E_5^3	4.340	0.8840	—	—	95.3760	5CaNa3+Gp
E_6^3	—	—	21.750	0.0065	78.2435	Na1+Pr
E_7^3	—	—	24.800	0.0078	75.1922	Pr+Cc

Конец таблицы 7						
1	2	3	4	5	6	7
E_8^3	—	0.6920	—	0.0063	81.7837	Gp+Cc
E_1^4	24.380	0.9110	20.290	—	54.4190	Te+Gb+Br
E_2^4	28.420	—	30.140	0.0058	41.4342	Na1+Br+Pr
E_3^4	15.190	0.8240	—	0.0067	83.9793	5CaNa3+Gp+Cc
E_4^4	16.980	0.7830	21.180	—	61.0570	Gb+Br+5CaNa3
E_5^4	—	0.5440	33.720	0.0091	65.7200	5CaNa3+Cc+Pr
E_6^4	—	0.6460	21.160	0.0053	78.1887	Br+Pr+5CaNa3

На основании эмпирических данных, которые обобщены в таблице 7 нами построены изотермические сечения диаграммы растворимости пятикомпонентной взаимной системы Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, CO_3^{2-} - H_2O (в виде четырехкомпонентной проекции). Безводная проекция построенной диаграммы представлена на рисунке 12 в форме равностороннего четырехугольника.

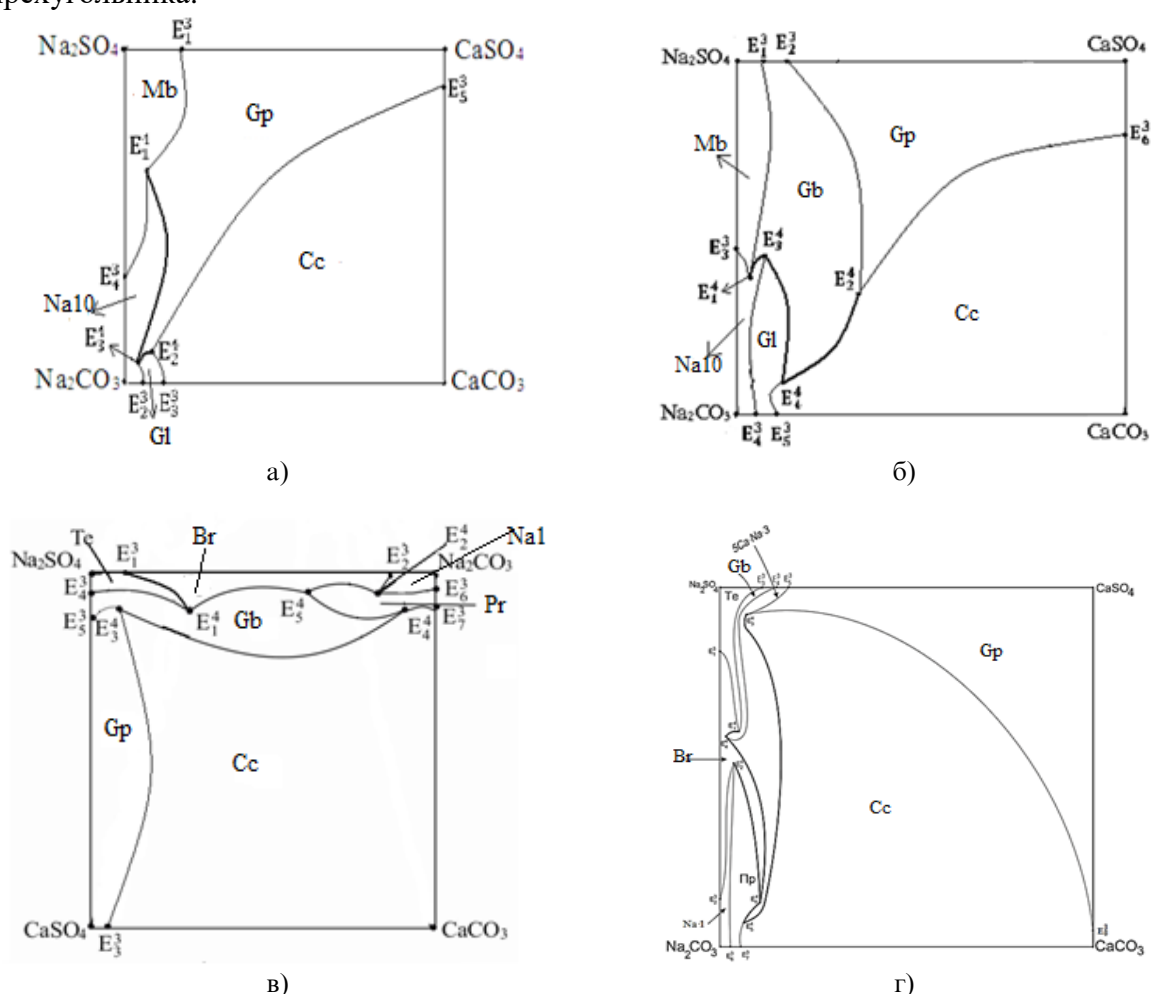
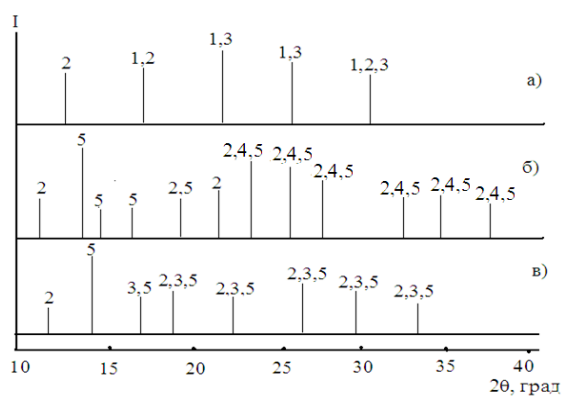


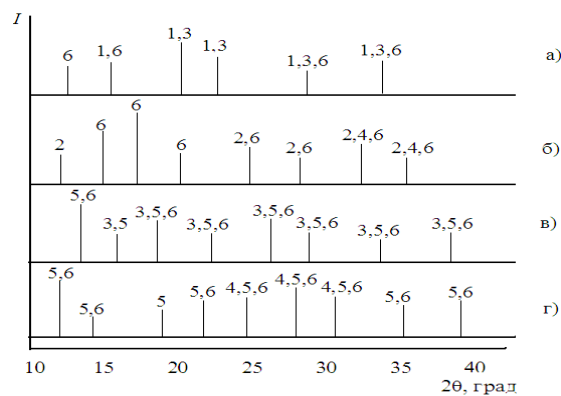
Рисунок 12. – Безводная (солевая) проекция диаграммы состояния системы Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, CO_3^{2-} - H_2O , представленная в изотермических режимах: 0; 25; 50 и 75 °C

Рисунок 13 демонстрирует рентгенограммы (штрихрентгенограммы) равновесных твердых фаз, полученные при экспериментальных изотермах системы Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, CO_3^{2-} - H_2O : 1) при 0, 2) при 25, 3) при 50 °C. Проведенный рентгенофазовый анализ (РФА) также подтверждает, что в точках, соответствующих невариантным равновесиям на четырехфазном уровне (тетраточки), сосуществуют (находятся в равновесии) три твердые фазы.



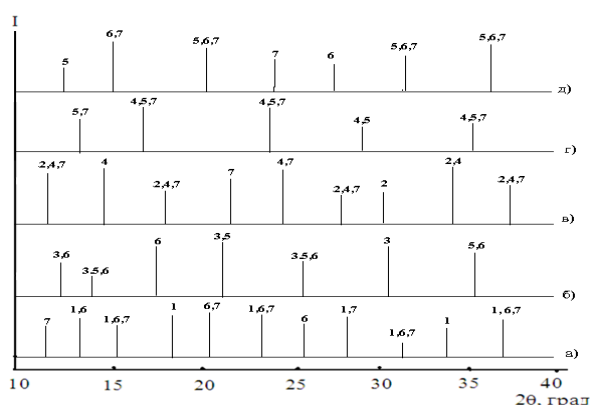
1)

a) Mb+Gp+Na10 (точка E_1^4); б) Gp+Gl+Cc (точка E_2^4); в) Gp+Na10+Gl (точка E_3^4);
1 – Mb, 2 – Gp, 3 – Na10, 4 – Cc, 5 – Gl



2)

a) Mb+Gb+Na10 (точка E_1^4); б) Gp+Gb+Cc (точка E_2^4); в) Na10+Gb+Gl (точка E_3^4); г) Cc+Gb+Gl (точка E_4^4);
1 – Mb, 2 – Gp, 3 – Na10, 4 – Cc, 5 – Gl, 6 – Gb



3)

a) Te + Br + Gb (точка E_1^4); б) Br + Na1 + Pr (точка E_2^4); в) Gb + Gp + Cc (точка E_3^4); г) Pr + Cc + Gb (точка E_4^4); д) Pr + Br + Gb (точка E_5^4). 1 – Te, 2 – Gp, 3 – Na1, 4 – Cc, 5 – Pr, 6 – Br, 7 – Gb

Предоставлен перевод с усилением научного стиля и уникальности формулировок:

Рисунок 13. – Штрихрентгенограммы равновесных твердых фаз, сформировавшихся в системе Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, CO_3^{2-} - H_2O при 0 °C: 1- 0 ; 2- 25 и 3- 50

Растворимость системы Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, HCO_3^- - H_2O . При изотермических режимах 0 ва 25 °C в исследуемой системе в качестве равновесных твердых фаз кристаллизуются (выпадают в осадок) следующие соединения: $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ - гидрокарбонат кальция (CaH), NaHCO_3 - нахколит (Nk), $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ - мирабилит (Mb), $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ - гипс (Gp) ва $\text{CaSO}_4 \cdot \text{Na}_2\text{SO}_4$ - глауберит (Gb) осаждаются как равновесные фазы. Для реализации поставленных экспериментальных задач был использован нижеперечисленный перечень реактивов, марок: $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ «х.ч.», NaHCO_3 «ч.», $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ «ч.», $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ «х.ч.».

В таблице 8 представлены итоговые данные, полученные нами, относительно растворимости индивидуальных соединений в невариантных точках исследуемой системы. Эти данные охватывают уровень трехкомпонентного и четырехкомпонентного составов.

Таблица 8. – Данные о растворимости в системе Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, HCO_3^- - H_2O

№ точки	Состав жидкой фазы, мас. %					Состав фазового осадка
	Na ₂ SO ₄	NaHCO ₃	CaSO ₄	Ca(HCO ₃) ₂	H ₂ O	
Температура 0 °С						
E ₁ ³	2.570	5.820	—	—	91.610	Mb+Nk
E ₂ ³	4.340	—	0.196	—	95.464	Mb+Gp
E ₃ ³	—	—	0.217	0.083	99.700	Gp+CaH
E ₁ ⁴	3.430	5.220	0.326	—	91.024	Mb+Gp+Nk
E ₂ ⁴	—	4.865	0.131	0.153	94.851	Gp+Nk+CaH
Температура 25 °С						
E ₁ ³	20.680	4.160	-	-	75,160	Nk+Mb

Конец таблицы 8						
1	2	3	4	5	6	7
E_2^3	-	4.890	-	0.0109	95.090	Nk+CaH
E_3^3	-	-	0.1860	0.0168	99.7970	CaH+Gp
E_4^3	21.750	-	0.197	-	78.050	Mb+Gp
E_5^3	25.780	-	0.188	-	74.030	Gb+Gp
E_1^4	28.380	5.200	0.270	-	66.150	Nk+Mb+Gb
E_2^4	25.140	-	0.184	0.0136	74.660	Gb+Gp+CaH
E_3^4	24.400	7.120	-	0.0163	68.460	Nk+CaH+Gb

Моновариантные линии равновесия отражают тенденцию к относительному снижению растворимости сульфата натрия и гидрокарбоната натрия вдоль этих кривых. Подобное явление коррелирует (обусловлено) с введением последующих (дополнительных) фаз. Вследствие низкой растворимости этих новых компонентов, они оказывают существенное влияние на растворимость хорошо растворимых солей. На основании систематизированных данных таблицы 8, нами была сконструирована диаграмма растворимости четырехкомпонентной системы Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, HCO_3^- - H_2O при изотерме 0 и 25 °С. Эти диаграммы визуализированы на рисунке 14.

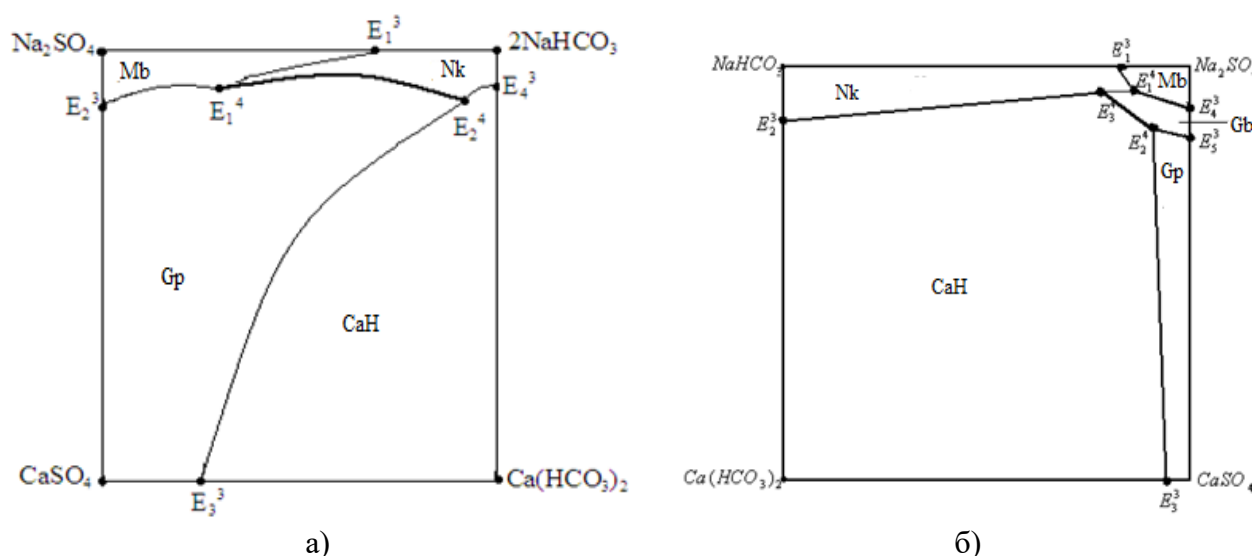


Рисунок 14. – Безводная (солевая) проекция диаграммы растворимости системы Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, HCO_3^- - H_2O при следующих изотермических условиях:
а) при 0 и б) 25 °С

Исследование растворимости в системе Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, HCO_3^- - H_2O . В заданных условиях равновесными твердыми фазами, способными кристаллизоваться в исследуемой системе, являются: CaCO_3 - кацит (Cc); $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ - декагидрат карбонат натрия (Na10); $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{CaCO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ - гейлюссит (Gl); NaHCO_3 - нахколит (Nk); $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ - кальций гидрокарбонат (CaH) и $\text{CaSO}_4 \cdot \text{Na}_2\text{SO}_4$ - глауберит (Gb).

В таблице 9 обобщены результаты растворимости индивидуальных соединений, полученные в неинвариантных точках исследуемой системы, которые относятся к уровню как трехкомпонентного, так и четырехкомпонентного составов.

Таблица 9. – Данные о растворимости в системе Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{CO}_3^{2-}$, HCO_3^- - H_2O

№ точки	Состав жидкой фазы, мас.%, мас.%					Равновесная твёрдая фаза
	Na ₂ CO ₃	NaHCO ₃	CaCO ₃	Ca(HCO ₃) ₂	H ₂ O	
Изотерма 0 °C						
e ₁	6.5700	-	-	-	93.4300	Na10
e ₂	-	6.4900	-	-	93.5100	Nk
e ₃	-	-	0.0031	-	99.9969	Cc
e ₄	-	-	-	0.1440	99.8560	CaH
E ₁ ³	5.600	4.610	-	-	89.790	Na10+Nk
E ₂ ³	12.00	-	0.0048	-	87.9952	Na10+Gl
E ₃ ³	4.300	-	0.0046	-	95.6954	Gl+Cc
E ₄ ³	-	4.890	-	0.109	95.001	Nk+CaH
E ₅ ³	-	-	0.0014	0.0830	99.9156	Cc+CaH
E ₁ ⁴	6.1670	2.4430	0.0065	-	91.3835	Na10+Nk+Gl
E ₂ ⁴	5.9040	-	0.0057	0.3080	93.7823	Cc+Gl+CaH
E ₃ ⁴	5.5100	5.8960	-	0.1900	88.4040	Nk+CaH+Gl
Изотерма 25 °C						
e ₁	22.9500	-	-	-	77.0500	Na10
e ₂	-	-	0.0048	-	99.9952	Cc
e ₃	-	9.3900	-	-	90.6100	Nk
e ₄				0.0160	99.9840	CaH
E ₁ ³	22.4600	2.8400	-	-	74.7000	Na10+Tr
E ₂ ³	17.6200	4.6200	-	-	77.7600	Tr+Nk
E ₃ ³	5.6500	-	0.0035	-	94.3465	Na10+Gl
E ₄ ³	4.5000	-	0.0024	-	95.4976	Gl+Cc
E ₅ ³	-	5.4300	-	0.0181	94.5519	Nk+CaH
E ₆ ³	-	-	0.0046	0.0179	99.9775	Cc+CaH
E ₁ ⁴	7.8500	3.7200	0.00336	-	88.4266	Na10+Tr+Gl
E ₂ ⁴	9.8300	4.6820	-	0.0229	85.4651	Tr+Nk+CaH
E ₃ ⁴	-	4.4150	0.00423	0.0215	95.5592	Cc+CaH+Gl
E ₄ ⁴	8.6740	3.9180	-	0.0198	87.3882	Tr+Gl+CaH

Согласно экспериментальным данным о растворимости, приведенным в таблице 9, повышение температурного режима оказывает комплексное воздействие на систему Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{CO}_3^{2-}$, HCO_3^- - H_2O . Данное влияние проявляется не только в трансформации геометрических параметров кривых растворимости, но и в качественном изменении фазового состава. Сравнительный анализ изотерм показывает существенное усложнение топологии диаграммы при повышении температуры относительно базисных данных при 0 °С. При сопоставлении растворимости индивидуальных компонентов системы выявлена отчетливая температурная динамика (при повышении температуры): карбонат натрия: наблюдается рост концентрации в растворе с 6,57 до 22,95 %; гидрокарбонат натрия: содержание увеличивается с 6,49 до 9,39 %; карбонат кальция: отмечается незначительное повышение растворимости с 0,0031 до 0,0048 %; гидрокарбонат кальция: в отличие от натриевых солей, зафиксировано снижение растворимости с 0,144 до 0,0160 %. Помимо количественных изменений, термическая активация инициирует межфазовое взаимодействие между декагидратом карбоната натрия и нахколитом. Результатом данного процесса является нуклеация и последующее формирование новой равновесной твердой фазы - троны, представляющей собой кристаллогидрат двойной соли натрия.

Для изотермического сечения системы при температуре 0°C определены следующие концентрационные параметры жидкой фазы, соответствующие точкам на моновариантных кривых: равновесие Na10 + Nk: содержание карбоната натрия Na_2CO_3 составляет 5,6 %, гидрокарбоната натрия - NaHCO_3 - 4,61 %; равновесие Na10 + Gl: при концентрации Na_2CO_3 - 12,0 % содержание карбоната кальция CaCO_3 зафиксировано на уровне 0,0048 %; равновесие Gl + Cc: состав жидкой фазы характеризуется наличием 4,3 % - Na_2CO_3 и 0,0046 % - CaCO_3 ; равновесие Nk + CaH: содержание компонентов составляет 4,89 % - NaHCO_3 и 0,109 % гидрокарбоната кальция $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$; равновесие Cc + CaH: концентрация солей достигает 0,0014 % CaCO_3 и 0,083 % $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$.

Установлено, что для изотермического сечения при 25°C состав жидкой фазы в точках совместного насыщения характеризуется следующими параметрами: система Na10 + Tr: концентрация составляет 22,46 % - Na_2CO_3 и 2,84 %; система Tr + Nk: содержание Na10+Tr: 17,62 % - Na_2CO_3 и 4,62 - NaHCO_3 ; система Na10 + Gl: при концентрации 5,65 % - Na_2CO_3 и 0,0035 % - CaCO_3 ; система Gl + Cc: характеризуется наличием 4,5 % - Na_2CO_3 и 0,0024 % - CaCO_3 ; система Nk + CaH: равновесные концентрации составляют 5,43 % - NaHCO_3 и 0,0181 % $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$; система Cc + CaH: содержание компонентов достигает 0,0046 % - CaCO_3 и 0,0179 % - $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$. Выявлено, что варьирование температурного режима детерминирует не только изменение растворимости компонентов, но и инициирует формирование новых равновесных твердых фаз. В исследуемой системе наблюдаются существенные трансформации в процессах фазообразования, а также закономерные изменения концентрационных профилей в узловых точках диаграммы.

По данным таблицы 9 построена диаграмма растворимости при двух температурах (0 и 25°C) для системы Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{CO}_3^{2-}$, HCO_3^- - H_2O , которая является четырехкомпонентной. На рисунке 15 представлена полная водно-солевая прекия этой диаграммы.

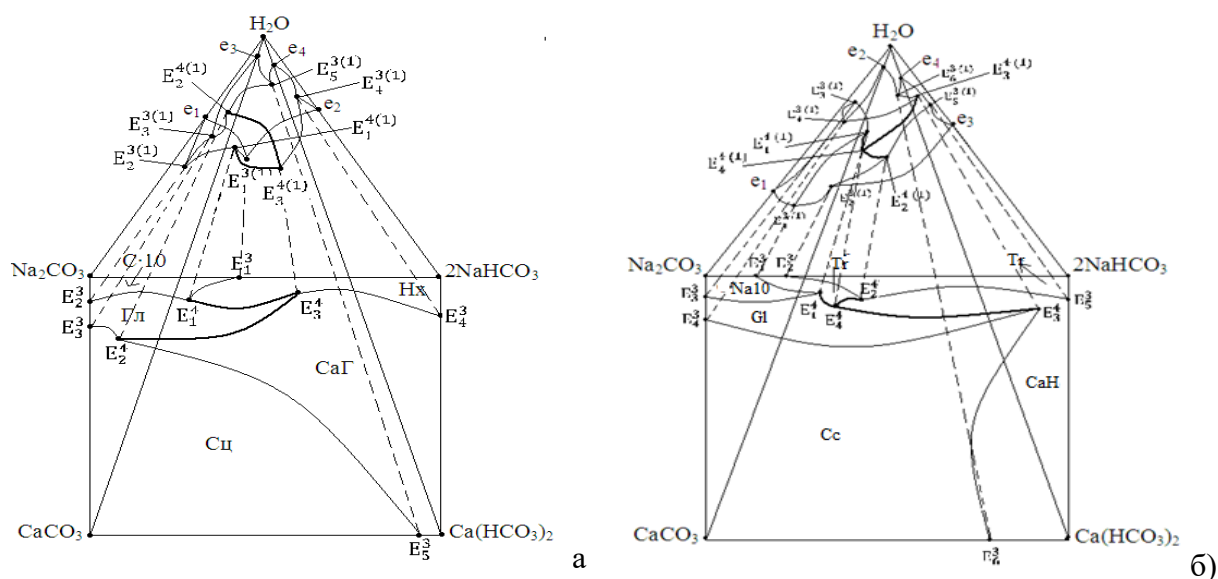


Рисунок 15. – Диаграмма растворимости системы Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{CO}_3^{2-}$, HCO_3^- - H_2O :
а) при 0°C и б) при 25°C .

Концентрационные параметры равновесных твердых фаз в многокомпонентной системе Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{CO}_3^{2-}$, HCO_3^- - H_2O , которая является для технологической разработки утилизации жидких отходов алюминиевого производства фундаментальной основой.

Многокомпонентная система Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{CO}_3^{2-}$, HCO_3^- - H_2O и её неинвариантное равновесие. Концентрация равновесной жидкой фазы в неинвариантной точке в соответствии с теорией физико-химического анализа должна быть постоянной независимо от вариантов механизма образования этой точки. Однако, данные прежних работ показывают, что могут только для одного фазового состава твердого осадка в неинвариантных точках фиксироваться

множество равновесных насыщенных растворов. Причем, содержание в них компонентов также варьируется. Например, для одной из невариантных точек пятикомпонентной системы $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+} \parallel \text{CO}_3^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$ при температуре 0°C было установлено два разных состава равновесной жидкой фазы (табл. 10).

Таблица 10. – Данные о растворимости в системе $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+} \parallel \text{CO}_3^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$ при 0°C

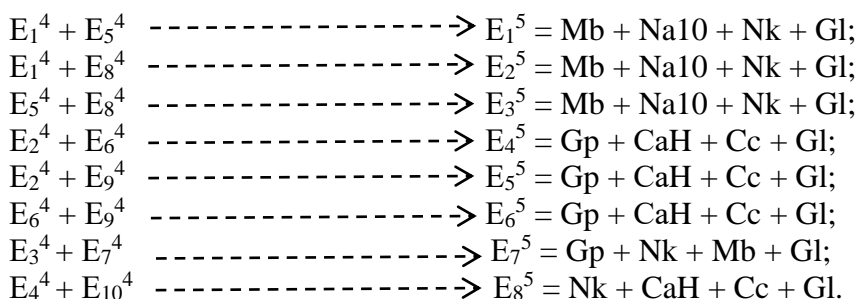
Пример	Состав насыщенного раствора, мас. %							Состав твёрдой фазы
	Na_2SO_4	NaHCO_3	CaSO_4	Na_2CO_3	CaCO_3	$\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$	H_2O	
СЖО	5.2800	4.5100	-	5.7800	0.0054	-	84.4246	$\text{Nk} + \text{Mb} + \text{Na10} + \text{Gl}$
Эксп.	5.3700	4.6900	-	5.7600	0.0061	-	84,1739	$\text{Nk} + \text{Mb} + \text{Na10} + \text{Gl}$

Как свидетельствует таблица 10, для идентичного фазового состава твердого осадка в равновесии, равновесная жидкая фаза характеризуется различным содержанием соответствующих солей. На основании этого можно сделать заключение, что четыре указанные равновесные твердые фазы, ассоциированные с данной невариантной точкой, способны к совместной кристаллизации не при некоторой фиксированной равновесной концентрации жидкой фазы, а, скорее, внутри определенного интервала концентраций присутствующих в ней солей.

Практический опыт применения метода трансляции для прогнозирования и построения диаграмм фазового равновесия многокомпонентных (пяти- и шестикомпонентных) систем указывает на существование различных вариантов формирования их геометрических форм. В ходе экспериментального исследования методом растворимости для пятикомпонентной системы $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}, \text{CO}_3^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$ при 0°C были идентифицированы 4 невариантные точки со следующим составом равновесных твердых фаз: $\text{E}_1^5 = \text{Mb} + \text{Na10} + \text{Nk} + \text{Gl}$; $\text{E}_2^5 = \text{Gp} + \text{CaH} + \text{Cc} + \text{Gl}$; $\text{E}_3^5 = \text{Gp} + \text{Nk} + \text{Mb} + \text{Gl}$; $\text{E}_4^5 = \text{Nk} + \text{CaH} + \text{Cc} + \text{Gl}$. При этом, для невариантной точки 1 эмпирически были обнаружены два состава насыщенного раствора, тогда как для двух других точек было зафиксировано по одному составу.

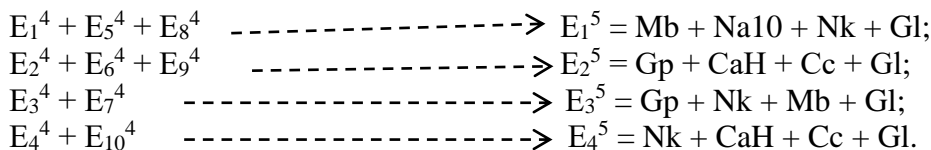
Сведения, полученные с использованием метода трансляции, подтверждают существование четырех невариантных точек для данной системы, а также предоставляют теоретическое обоснование наличию различных составов насыщенного раствора для одной и той же точки. Этот факт может быть верифицирован посредством анализа путей формирования невариантных точек системы $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}, \text{CO}_3^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$ при 0°C .

Трансляция четырехкомпонентных невариантных точек на поверхность пятикомпонентного состава приводит к формированию моновариантных линий, а их взаимное пересечение, в полном соответствии с правилом фаз Гиббса, обуславливает возникновение следующих пятифазных невариантных точек:



Как показал анализ, из восьми теоретически возможных пятифазных невариантных точек, возникающих в результате трансляции $\text{E}_1^5, \text{E}_2^5, \text{E}_3^5, \text{E}_4^5, \text{E}_5^5, \text{E}_6^5$ некоторые из них характеризуются идентичным составом равновесных твердых фаз. Это обусловлено тем, что указанные точки образуются трехсторонним пересечением моновариантных линий. Они сгенерированы при трансляции четырехфазных невариантных точек. Поэтому, для системы $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}, \text{CO}_3^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$, которая является пятикомпонентной, при 0°C

характерны не восемь, а только четыре истинные пятифазные инвариантные точки, формирование которых реализуется следующим образом:



На основании вышеизложенного представляется возможным прогнозировать, что вариативность состава насыщенного раствора в инвариантных точках многокомпонентной системы при идентичном качественном составе равновесных твердых фаз (табл. 5.1) детерминирована различными траекториями достижения термодинамического равновесия. В связи с этим, процесс формирования пятикомпонентных инвариантных точек E_1^5 и E_2^5 для водно-солевой системы Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, CO_3^{2-} , HCO_3^- - H_2O при 0°C может быть графически интерпретирован следующим образом (рис. 16).

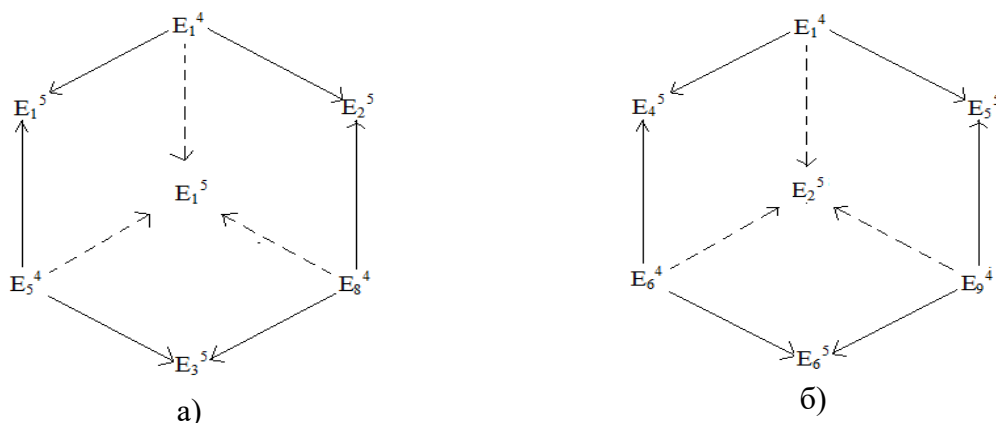


Рисунок 16. – Система Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, CO_3^{2-} , HCO_3^- - H_2O и схема вариантов образования в ней при 0°C инвариантных точек при трансляции четырехфазных точек на поверхность пятикомпонентного состава с осадками: а) $\text{Mb}+\text{Na10}+\text{Nk}+\text{Gl}$; б) $\text{Gr}+\text{CaH}+\text{Cc}+\text{Gl}$

Сплошные кривые (рис. 11) отображают двустороннее пересечение кривых. Пунктирные линии на этом рисунке являются трехсторонним пересечением инвариантных кривых. Указанное происходит при образовании инвариантных точек E_1^5 и E_2^5 . С учетом сказанного можно предложить гипотезу о том, что инвариантные равновесия в диаграммах многокомпонентных систем могут быть отражены не только в виде безразмерных точек. Они могут быть в виде геометрических (инвариантных) выражений с определенной размерностью. Последняя детерминирована различным составом равновесной жидкой фазы. Этот состав характерен для одного и того же фазового состава твердого равновесия.

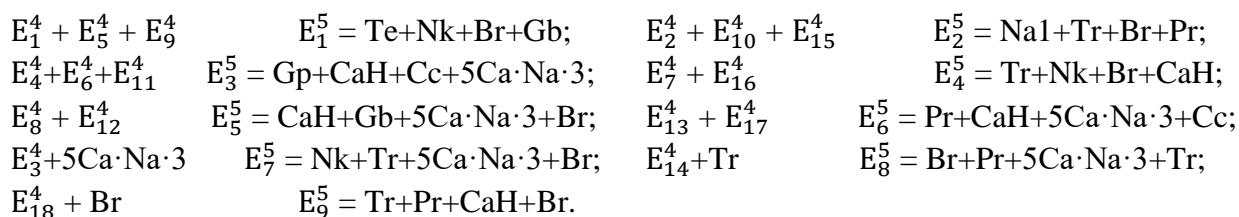
Состав равновесной жидкой фазы инвариантной точки этой геометрической точки может быть ассоциирована различными путями. Эта гипотеза доказывается не только растворимостью пятикомпонентной системы Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, CO_3^{2-} , HCO_3^- - H_2O при 0°C . В пользу указанной гипотезы выступают результаты изучения многокомпонентных систем и других авторов. Отличающиеся химические составы насыщенного раствора приведенной выше системы при 0°C (табл. 10), отвечающие одному и тому же составу твердых фаз инвариантной точки, конечно же могут быть интерпретированы последовательным внесением определенных солей в исходную смесь. Такой подход необходим для соответствия использованных вариантов трансляции четырехфазных инвариантных точек на поверхность пятикомпонентного состава.

Мы продемонстрировали принципиальную возможность соответствия одного состава твердых фаз инвариантной точки отличающимся по химическому составу равновесным жидким фазам. Так может быть когда изучаемая система является многокомпонентной. Причина - многообразие вариантов достижения инвариантного равновесия. Поэтому, инвариантное равновесие рассмотренной диаграммы многокомпонентной системы может

быть отражено как в форме точки (единственный вариант образования), так и в виде геометрического выражения точки (квзиточки). В последнем случае она должна обладать определенной размерностью, а возможность достижения равновесия более чем один вариант.

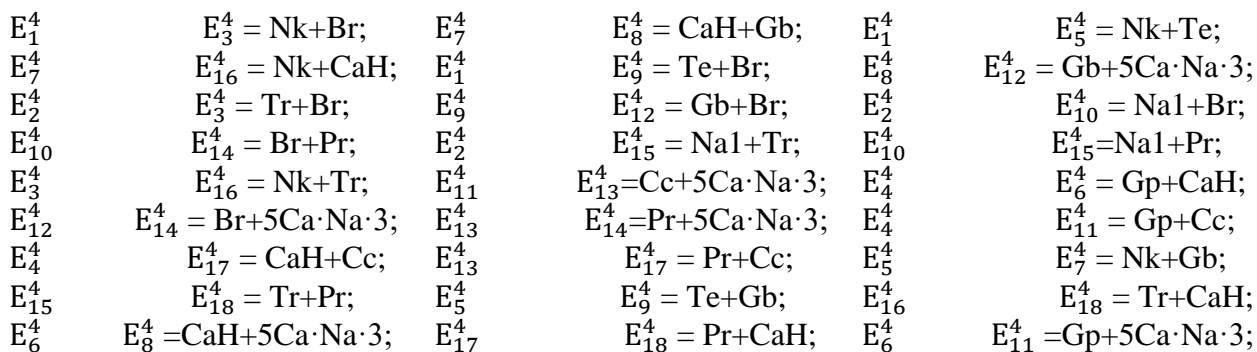
Многокомпонентная система Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, CO_3^{2-} , HCO_3^- - H_2O и её моновариантное равновесие. С фундаментальной точки зрения и для выяснения оптимальных условий переработки природного полиминерального и сложного технического сырья (в том числе промышленные отходы) знание закономерностей фазовых равновесий и структуры фазовых комплексов многокомпонентных систем чрезвычайно важно. Существующие закономерности определить экспериментально невозможно из-за серьезных проблем. Это - отсутствие многомерных геометрических фигур изображения установленных закономерностей; сложность достоверного нахождения равновесных твердых фаз (из-за их морфологического разнообразия и большого числа), большие временные и материальные затраты. Решение некоторых из этих трудностей имеет ограниченный характер. Например, применение минимизации энергии Гиббса дает хорошие данные только для четырехкомпонентных систем. Для пяти- и шестикомпонентных систем достоверность расчетов значительно снижается. Кроме того, в этом случае невозможно построить замкнутую диаграмму фазового комплекса.

Опыт применения метода трансляции для исследования сегментов пятикомпонентной системы Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, CO_3^{2-} , HCO_3^- - H_2O указывает на разнообразие характера формирования геометрических форм, в частности, моновариантных линий. Далее представлено математическое выражение различных вариантов пересечения моновариантных линий, которые возникают в результате трансформации четырехфазных точек (таб. 3, которая содержит состав этих точек), где одна из равновесных твердых фаз является переменной.

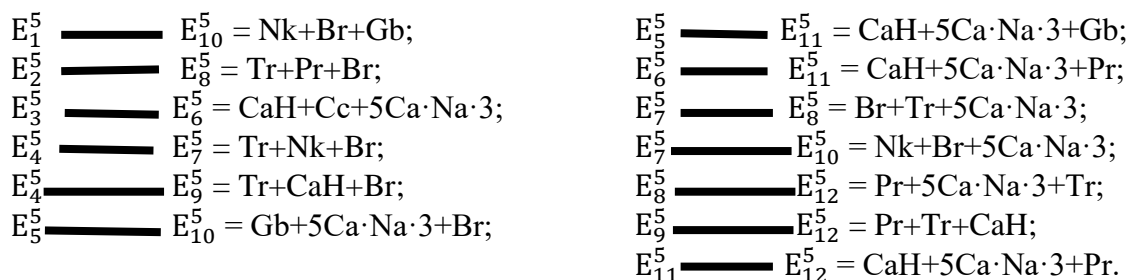


Четырехфазные невариантные точки (рис. 7, г) соединяют различные виды линий. Они являются моновариантными кривыми на уровне четырехкомпонентного состава. Пунктирные линии транслируют и соединяют четырех- и пятикомпонентные невариантные точки. Они являются моновариантными кривыми на уровне пятикомпонентного состава и возникают при трансляции четырехкомпонентных невариантных точек на поверхность пятикомпонентных. Стрелка является направлением трансляции, а широкие сплошные линии проходят между пятикомпонентными невариантными точками и отражают их моновариантные равновесия.

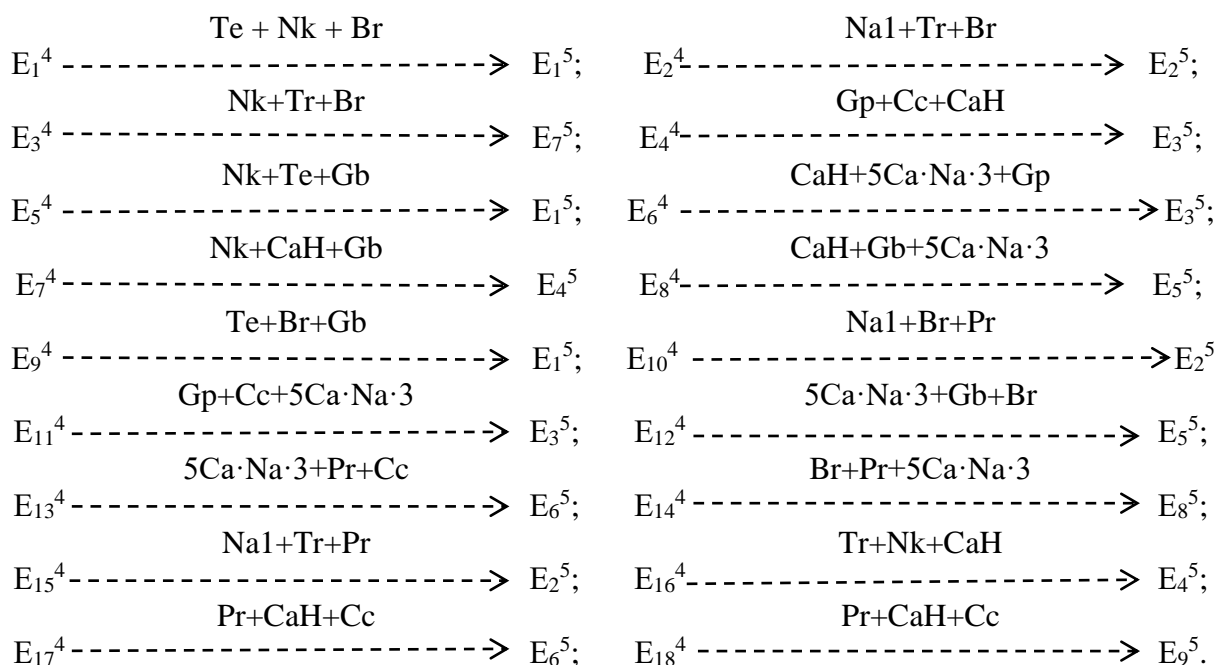
Моновариантные линии (рис. 7, г), дифференцируются как по своей геометрической фигуре, так и равновесному составу твердых фаз. Если моновариантные линии проходят между четырехфазными невариантными точками, им свойственно сосуществование такой пары твердых фаз:



Моновариантные линии пятикомпонентного состава проходят между пятифазными инвариантными точками (рис. 7, г – широкие сплошные линии). Им соответствует такой фазовый состав осадков:



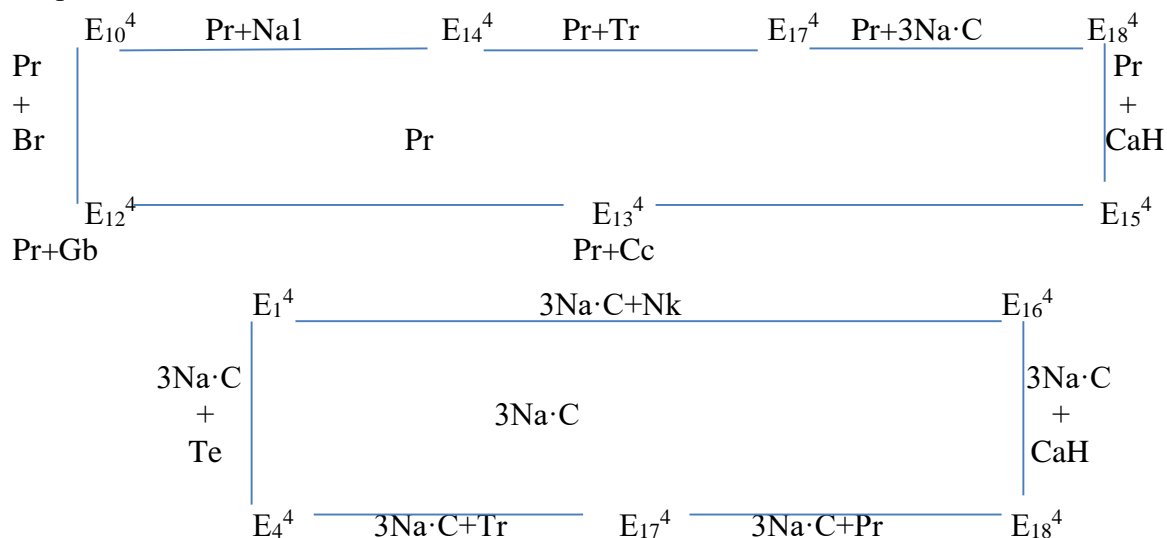
Формирование другого вида моновариантных линий связано с трансформацией инвариантных точек четырехкомпонентного состава в моновариантные линии на поверхность пятикомпонентного. Если в начальные четырехкомпонентные подсистемы добавить пятый компонент, то линии возникают на уровне пятикомпонентного состава. Нами установлено, что четырехфазные инвариантные точки четырехфазных четырехкомпонентных подсистем при трансляции на уровень пятикомпонентного состава превращаются в моновариантные линии пятифазных инвариантных точек:



В результате построения и анализа совмещенной диаграммы фазового комплекса на уровне четырех- и пятикомпонентных составов была установлена реализация следующих моновариантных связей: 27 моновариантных линий, соединяющих между собой четверные инвариантные точки; 13 моновариантных линий, пролегающих между пятерными инвариантными точками (что указывает на специфику фазового генезиса или альтернативные траектории формирования равновесий в данных узлах); 18 моновариантных линий, обеспечивающих сопряжение между четверными и пятерными инвариантными точками. Данные количественные характеристики определяют геометрическую структуру фазового пространства и позволяют прогнозировать поведение системы при варьировании компонентного состава.

Дивариантное равновесие в многокомпонентной системе Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, CO_3^{2-} , HCO_3^- - H_2O . Вполне естественно, что чем больше инвариантных точек и моновариантных линий участвует в ограничении дивариантных полей, тем большую часть исследуемой системы эти поля занимают. Например, в ограничении дивариантного поля с равновесной твердой фазой Pr (пирсонит, рис. 7, д) участвуют 7 инвариантных точек и 7 моновариантных линий, в то время как в ограничении дивариантного поля с равновесной

твёрдой фазой $3\text{Na}\cdot\text{C}$ предположительно участвуют 5 неинвариантных точек и 5 моновариантных линий:

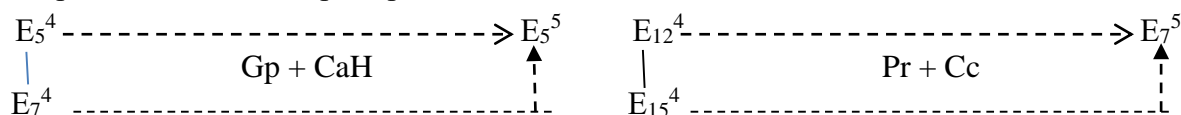


Этот факт демонстрирует, что первое дивариантное поле в указанных условиях занимает больший сегмент системы по сравнению со вторым дивариантным полем.

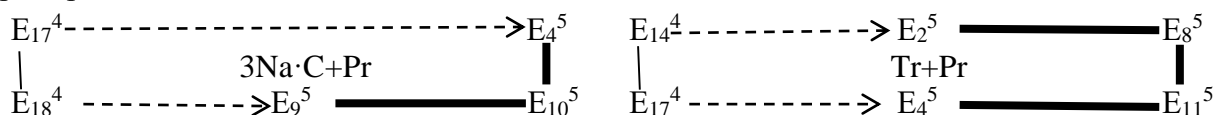
При переходе системы с четырехкомпонентного на пятикомпонентный уровень (путем добавления пятого компонента в одну из пяти исходных четырехкомпонентных подсистем) происходит трансформация геометрических форм четырехкомпонентных систем с их последующей трансляцией на поверхность пятикомпонентного состава. В дальнейшем транслированные геометрические формы участвуют в структурировании элементов диаграммы исследуемой системы на пятикомпонентном уровне.

В рамках поставленной задачи мы рассмотрим примеры формирования дивариантных полей и возможности определения пути кристаллизации твердых фаз, исходя из их структуры. Формирование дивариантных полей на уровне пятикомпонентного состава реализуются двумя основными путями: первый путь связан с трансляцией моновариантных линий с четырехкомпонентного уровня на пятикомпонентный; второй - с ограничением поверхности системы пятифазными неинвариантными точками и моновариантными линиями, проходящими между ними. Дивариантные поля, которые образуются в результате трансляции моновариантных линий с четырехкомпонентного на пятикомпонентный уровень, могут быть ограничены следующим образом (рис. 7, д).

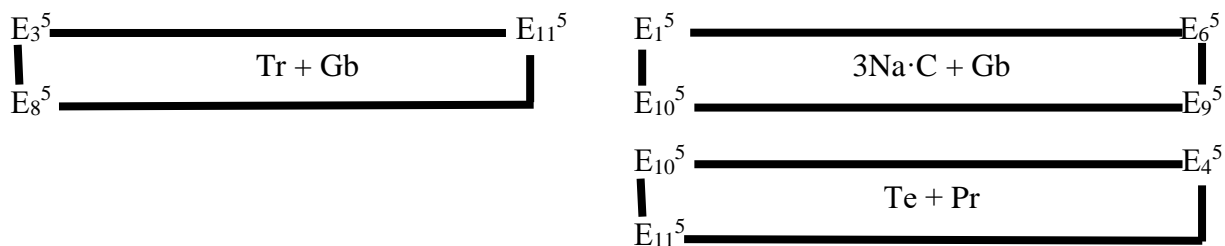
а) Пятифазные неинвариантные точки - моновариантные линии, проходящие между ними, которые, в свою очередь, возникли в результате трансляции четырехфазных неинвариантных точек. Пример:



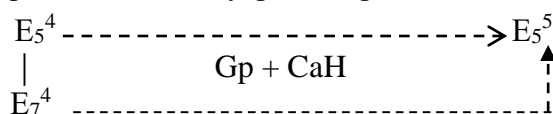
б) Пятифазные неинвариантные точки - моновариантные линии, проходящие между этими точками, возникшие в результате трансляции четырехфазных неинвариантных точек. Пример:



Анализ структуры диаграммы фазового комплекса системы Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, CO_3^{2-} , HCO_3^- - H_2O при 100°C демонстрирует, что вторым путем формирования (связанным с ограничением поверхности пятифазными неинвариантными точками и моновариантными линиями между ними) трех (3) дивариантных полей. Эти поля имеют следующие контуры (рис. 7, д):



Принципы формирования геометрических форм, в частности, дивариантных полей имеют научно-теоретическое значение не только для понимания закономерностей, определяющих структуру диаграмм многокомпонентных физико-химических систем, но и чрезвычайно важны для решения практических задач, особенно при определении возможных путей кристаллизации твердых фаз. Например, если фигуративная точка состава фрагмента гипса ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) исследуемой системы при 100°C в начале изотермического упаривания расположена внутри дивариантного поля:

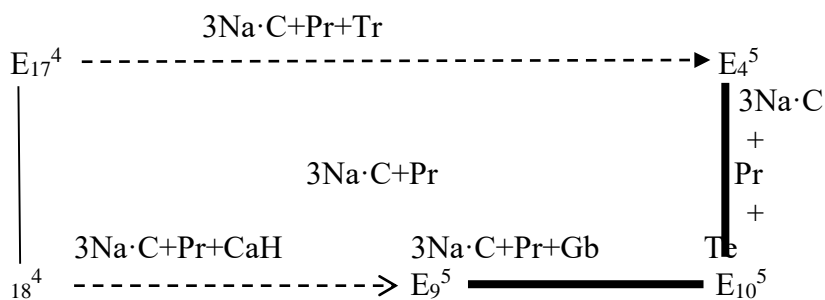


Если фигуративная точка находится в дивариантном поле с Gp (гипс) в качестве единственной твердой фазы, то для продолжения пути кристаллизации существуют две возможности, отличающиеся по числу моновариантных линий на уровне пятикомпонентного состава, которые ограничивают это поле:

а) кристаллизация глауберита: в сторону моновариантной линии E_5^4 -- E_5^5 . После достижения этой линии в качестве четвертой равновесной твердой фазы начинает кристаллизоваться Gb (глауберит);

б) кристаллизация кальцита: в сторону моновариантной линии E_7^4 -- E_5^5 . После достижения этой линии в качестве четвертой равновесной твердой фазы начинает кристаллизоваться Cc (кальцит).

Впоследствии путь кристаллизации завершается в невариантной точке E_5^5 с сосуществующими равновесными твердыми фазами $\text{Gp}+\text{Cc}+\text{CaH}+\text{Gb}$.



При локализации фигуративной точки исходного состава смеси в пределах дивариантного поля количество потенциальных путей кристаллизации четвертой равновесной твердой фазы определяется числом моновариантных линий, существующих на гиперповерхности фазового комплекса пятикомпонентной системы. В данном случае допускается три альтернативных направления развития процесса. Впоследствии выбранная траектория кристаллизации завершается в одной из трех пяттерных невариантных точек системы.

В процессе фазообразования при достижении моновариантной кривой $E_{17}^4E_4^5$ на траектории кристаллизации фиксируется появление третьей равновесной твердой фазы — троны (Tr). Завершение процесса кристаллизации происходит в невариантной точке E_4^5 , где сосуществуют следующие равновесные твердые фазы: $3\text{Na}\cdot\text{C}+\text{Pr}+\text{Tr}$. Аналогичным образом, при выходе на моновариантную линию $E_{18}^4E_9^5$ в ходе кристаллизации в качестве третьей равновесной твердой фазы выступает гидрокарбонат кальция (CaH). В данном случае

процесс кристаллизации финализируется в невариантной точке E_9^5 , характеризующейся равновесием твердых фаз $3Na\cdot C + Pr + CaH$.

При выходе на моновариантные кривые $E_9^5E_{10}^5$ и $E_4^5E_{10}^5$ в процессе кристаллизации дальнейшая эволюция системы детерминирована условиями насыщения раствора относительно четвертой равновесной твердой фазы. Если достижение моновариантной линии $E_9^5E_{10}^5$ сопровождается ростом концентрации раствора за счет растворения троны, вектор кристаллизации смещается в сторону пятикомпонентной невариантной точки E_9^5 . По достижении данного состояния устанавливается равновесие между следующими твердыми фазами: $3Na\cdot C + Pr + CaH + Gb$. В случае, если при выходе на линию $E_4^5E_{10}^5$ фиксируется повышение концентрации системы за счет тенардита, траектория кристаллизации направляется к шестикомпонентной невариантной точке E_{10}^5 . Финальное равновесное состояние в этой точке характеризуется сосуществованием твердых фаз $3Na\cdot C + Pr + CaH + Gb$.

Растворимость пятикомпонентной взаимной системы Na^+ , $Ca^{2+} \parallel SO_4^{2-}$, CO_3^{2-} , HCO_3^- - H_2O при 0 °С. Установлено, что в указанной системе при приведенной температуре в осадок выпадают следующие равновесные твердые фазы: $Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$ - мирабилит (Mb); $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ - гипс (Gp); $Na_2CO_3 \cdot CaCO_3 \cdot 5H_2O$ - гейлюссит (Gl); $CaCO_3$ - кальцит (Cc); $Na_2CO_3 \cdot 10H_2O$ - декагидрат карбоната натрия (Na10); $NaHCO_3$ - нахколит (Nk); $Ca(HCO_3)_2$ - гидрокарбонат кальция (CaH). В таблице 11 приведены определенные нами данные о растворимости индивидуальных соединений и невариантных точек исследуемой системы на уровнях трехкомпонентного, четырехкомпонентного и пятикомпонентного составов.

Таблица 11. – Растворимость невариантных точек системы Na^+ , $Ca^{2+} \parallel SO_4^{2-}$, CO_3^{2-} , HCO_3^- - H_2O при 0 °С

№ точки	Состав жидкой фазы, мас. %							Состав фазового осадка
	Na_2SO_4	$NaHCO_3$	$CaSO_4$	Na_2CO_3	$CaCO_3$	$Ca(HCO_3)_2$	H_2O	
e_1	4.30	-	-	-	-	-	95.70	Mb
e_2	-	6.49	-	-	-	-	93.51	Nk
e_3	-	-	0.176	-	-	-	99.824	Gp
e_4	-	-	-	6.57	-	-	93.43	Na10
e_5	-	-	-	-	0.0031	-	99.9969	Cc
e_6	-	-	-	-	-	0.144	99.856	CaH
E_1^3	2.73	5.58	-	-	-	-	91.69	Mb+Nk
E_2^3	-	4.60	-	5.60	-	-	89.80	Nk+Na10
E_3^3	-	4.890	-	-	-	0.109	95.001	Nk+CaH
E_4^3	-	-	0.217	-	-	0.417	99.366	Gp+CaH
E_5^3	-	-	-	-	0.0097	0.219	99.6836	Cc+CaH
E_6^3	2.80	-	-	6.00	-	-	91.20	Mb+Na10
E_7^3	4.34	-	0.196	-	-	-	95.464	Gp+Mb
E_8^3	-	-	0.200	-	0.0045	-	99.7955	Cc+Gp
E_9^3	-	-	-	12.00	0.0049	-	87.9951	Gl+Na10
E_{10}^3	-	-	-	4.30	0.0048	-	95.6952	Cc+Gl
E_1^4	2.12	4.37	-	5.13	-	-	88.38	Mb+Na10+Nk
E_2^4	-	-	0.217	-	0.0014	0.830	98.9516	Gp+Cc+CaH
E_3^4	-	4.865	0.131	-	-	0.153	94.851	Gp+Nk+CaH
E_4^4	3.43	5.22	0.326	-	-	-	91.024	Mb+Gp+Nk
E_5^4	1.196	-	0.244	1.551	-	-	96.238	Mb+Na10+Gp
E_6^4	-	-	0.272	11.30	0.00465	-	88.4233	Gp+Gl+Cc
E_7^4	-	-	0.340	18.30	0.0125	-	81.3475	Na10+Gl+Gp
E_8^4	-	2.443	-	6.167	0.0065	-	91.3835	Na10+Nk+Gl
E_9^4	-	-	-	5.904	0.0057	0.308	93.7823	Cc+Gl+CaH

Конец таблицы 11								
1	2	3	4	5	6	7	8	9
E_{10}^4	-	5.896	-	5.510	-	0.190	88.404	Gl+Nk+CaH
E_1^5	5.37	4.69	-	5.76	0.0061	-	84.1739	Nk+Mb+Na10+Gl
E_2^5	3.42	5.16	0.312	7.26	0.0042	-	83.8438	Nk+Mb+Gp+Gl
E_3^5	-	3.83	0.274	4.41	0.0059	0.201	91.2791	Nk+CaH+Gp+Gl
E_4^5	-	-	0.265	6.53	0.0047	0.206	92.9943	Gp+Cc+CaH+Gl

На основе данных из таблицы 11 нами была построена диаграмма растворимости четырехкомпонентной системы Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, CO_3^{2-} , HCO_3^- - H_2O при температуре 0 °C. Эта диаграмма представлена на рисунке 17.

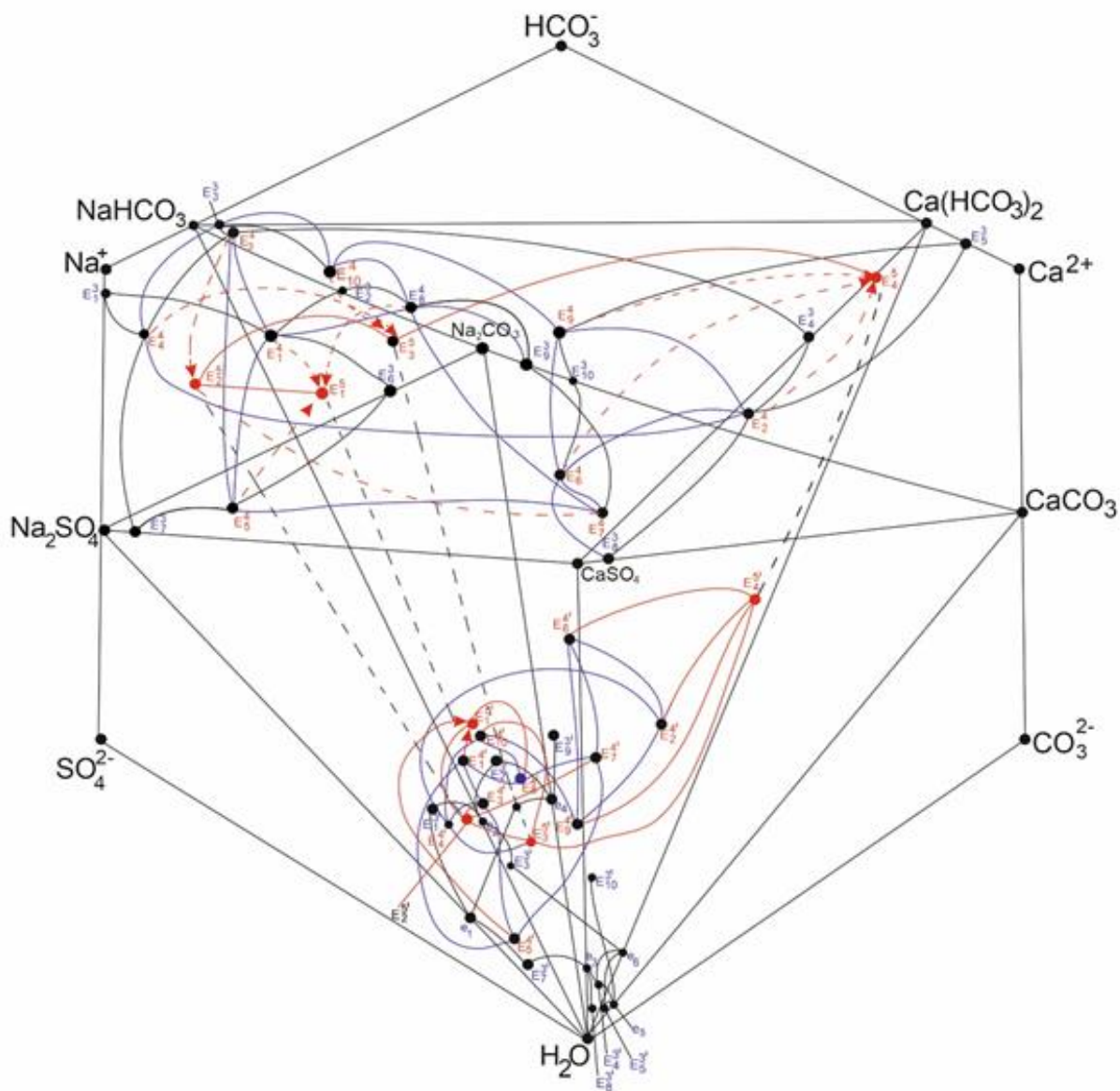


Рисунок 17. – Диаграмма растворимости системы Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, CO_3^{2-} , HCO_3^- - H_2O при 0 °C

Методы получения индивидуальных фаз из жидких отходов алюминиевого производства. Метод получения декагидрата карбоната натрия. Настоящая часть диссертационной работы посвящена переработке полиминеральных руд, которые содержат кристаллогидраты карбоната натрия. Из отходов алюминиевого производства получаем декагидрат карбоната натрия. Исходное сырье содержит карбонаты, гидрокарбонаты натрия и кальция, включая жидкие отходы алюминиевого производства.

Поставленная цель достигается путем обработки полиминеральных натрийсодержащих руд, растворенных в горячих циркулирующих щелочных растворах. После отделения нерастворимого остатка его обрабатывают при массовом соотношении Т:Ж (твердое:жидкое) 0.61:0.76 в течение 40-100 минут и при температуре 0-50 °С. Кроме того, щелочной раствор, полученный после обработки остатка (после сгущения и очистки), возвращается для растворения маточных растворов.

Из диаграммы состояния системы $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+} \parallel \text{CO}_3^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$ видно, что при 0 °С (рисунок 15, а) декагидрат карбоната натрия граничит с фазами гейлюссита и он обладает способностью к соосаждению в неинвариантных точках трехкомпонентного уровня. Однако, при температуре 25 °С фазовое равновесие декагидрата карбоната натрия изменяется. С повышением температуры от 0 до 50 °С наблюдается появление новой фазы - троны, что изменяет структуру диаграммы вышеупомянутой системы (рисунок 15, б), и в результате декагидрат карбоната натрия начинает граничить с фазами гейлюссита и троны, которые могут совместно осаждаться в точках осаждения трехкомпонентного уровня.

Растворимость в геометрических формах системы $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+} \parallel \text{CO}_3^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$ при 50 °С демонстрирует изменение полученных данных по сравнению с изотермами 0 и 25 °С. В частности, наблюдается увеличение растворимости декагидрата карбоната натрия от 6,570 и 22,95 % мас. при 0 и 25 °С, соответственно, до 32,10 % при 50 °С.

Сравнение изменений растворимости солей в неинвариантных точках, где три твердые фазы находятся в равновесии затруднено, поскольку фазовый состав осадков меняется с повышением температуры. Например, при 50 °С дегидратация декагидрата карбоната натрия ($\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) переходит в моногидрат карбоната натрия ($\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$). Также появляются новые равновесные твердые фазы: гейлюссит ($\text{CaCO}_3 \cdot \text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) и пирсонит ($\text{CaCO}_3 \cdot \text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). С этой точки зрения, если маточный раствор четырехкомпонентной системы, состоящий из карбонатов, гидрокарбонатов натрия и кальция подвергается перекристаллизации, из него можно выделить 25.53 г декагидрата карбоната натрия $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ при 50 °С; 32,1 г при 25 °С; 22,95 г поскольку: растворимость $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$. При 0 °С раствор содержит 6.750 г $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ и в результате его перекристаллизации выпадает и отделяется 16.38 г $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$.

Пример 1. В рамках исследования проведена химическая обработка 15 кг маточного раствора технического сырья, качественный состав которого представлен карбонатами, гидрокарбонатами натрия и кальция. Первичная стадия процесса осуществлялась при температуре 0 °С в течение 40 минут с применением щелочных реагентов согласно установленной методике. В результате последующего концентрирования и сепарации избыточного щелочного компонента был выделен промежуточный остаток. Масса полученного нагретого остатка составила 4,8541 кг. Его элементный и ионный состав (в мас. %) характеризуется следующими показателями: Na^+ -12,53053; Ca^{2+} - 0,03747; CO_3^{2-} - 12,9934; HCO_3^- - 6,9274, нерастворимый остаток 10,1459 и остальное вода. На втором этапе данный субстрат подвергался термохимическому воздействию при температуре 50 °С в течение 100 минут. Последующая очистка системы с использованием этилового спирта и проведение процедуры фильтрации позволили выделить 4,8541 кг щелочного раствора со следующим содержанием компонентов (в мас. %): Na^+ - 4,620; Ca^{2+} - 0,03676; CO_3^{2-} - 3,7206; HCO_3^- - 4,8213. Дополнительно было получено 4,30 кг твердого нерастворимого осадка, минералогическую основу которого составляют нахколит, трона, кальцит и гидрокарбонат кальция. Жидкая фаза (фильтрат) была рециркулирована в производственный цикл. Суммарный выход декагидрата карбоната натрия из щелочного раствора составил 61,02 % (количественные параметры коррелируют с данными, приведенными в табл. 9).

Пример 2. В ходе технологического процесса 20 кг маточного раствора исходного технического сырья, содержащего карбонатные и гидрокарбонатные соединения натрия и кальция, подвергались обработке при изотермическом режиме 25 °С в течение 40 минут по стандартной методике. В результате концентрирования системы и последующей декантации избыточной щелочной фазы был получен нагретый промежуточный продукт массой 6,4721 кг. Химический профиль полученного остатка (в массовых долях) характеризуется следующим содержанием компонентов: Na^+ - 13,6741; Ca^{2+} - 0,05142; CO_3^{2-} - 14,5738; HCO_3^- - 7,4251, твердая нерастворимая фракция: 13,5278 кг (водная фаза - остальное). На следующем этапе навеска обрабатывалась 5,7378 кг дистиллированной воды при температуре 50 °С с экспозицией в 100 минут. После экстракции этанолом и проведения вакуумной фильтрации было выделено 6,4721 кг щелочного фильтрата, имеющего следующий элементный состав: Na^+ - 2,506; Ca^{2+} - 0,001174; CO_3^{2-} - 2,5986; HCO_3^- - 1,3661 и вода - 8,9386. Параллельно зафиксировано образование 1,8908 кг нерастворимого осадка, представленного преимущественно фазами нахколита, троны, кальцита и гидрокарбоната кальция. Жидкая фаза рециркулируется в технологический цикл. Согласно расчетным данным, суммарная степень извлечения декагидрата карбоната натрия из щелочной среды составила 76,08 % (подробная верификация представлена в корреляционных табл. 9).

Пример 3. В представленном эксперименте 25 кг маточного раствора технического происхождения, содержащего карбонаты, гидрокарбонаты натрия и кальция, подвергались химической обработке при температуре 50 °С в течение 40 минут по апробированной методике. После стадии концентрирования и удаления избыточной щелочной фазы был выделен нагретый остаток массой 11,21 кг. Компонентный состав полученного субстрата (в массовых долях) составил: Na^+ - 17,4072; Ca^{2+} - 0,0062; CO_3^{2-} - 18,1728 и HCO_3^- - 9,2352, нерастворимая фракция 13,79 кг (остальное - вода). На последующем этапе навеска обрабатывалась 5,7118 кг воды при температуре 50 °С с выдержкой в течение 100 минут. В результате декантации с применением этилового спирта и последующей фильтрации было получено 11,21 кг щелочного раствора со следующим содержанием (в мас. долях): Na^+ - 4,8769; Ca^{2+} - 0,03127; CO_3^{2-} - 5,1794; HCO_3^- - 2,3078 и 9,653. Масса нерастворимого твердого остатка, представленного нахколитом, тронной, кальцитом и гидрокарбонатом кальция составила 2,9610 кг. Жидкая фаза была возвращена в производственный цикл. Суммарная степень извлечения декагидрата карбоната натрия достигла 80,20 % (согласно данным табл. 9).

Предложенный метод упрощает процесс переработки натрийсодержащих полиминеральных руд, поскольку исключаются процессы: охлаждение нерастворимого остатка сбросным щелочным раствором, отмывка нахколита из четырехкомпонентного состава. Увеличение количества декагидрата карбоната натрия достигается за счет его извлечения из нерастворимого остатка на уровне 2.295/100 кг маточного раствора жидких щелочных отходов, что подтверждается таблицами и рисунками 15: а и б состояния четырехкомпонентной системы Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{CO}_3^{2-}$, HCO_3^- - H_2O .

Метод получения нахколита. По данной теме получен малый патент РТ. Изобретение относится к области переработки полиминеральных руд, содержащих соединения натрия, и, в частности, к получению нахколита (NaHCO_3) из жидких отходов алюминиевого производства. Цель - получение нахколита из жидких отходов алюминиевого производства, в состав которых входят сульфаты, карбонаты и гидрокарбонаты натрия.

Поставленная цель достигается путем термической обработки полиминеральных натрийсодержащих руд, предварительно растворенных в горячих циркулирующих щелочных растворах. После отделения нерастворимого остатка его подвергают термической обработке при массовом соотношении Т:Ж (твердое:жидкое) 0.51:0.73 в течение 45-100 минут и при

температуре от 0 до 50 °С. Щелочной раствор, полученный после обработки остатка (после сгущения и очистки), возвращается в исходный маточный раствор.

Из диаграммы состояния системы $5\text{Na}^+ - \text{SO}_4^{2-} - \text{CO}_3^{2-} - \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$ видно, что при 0 °С (рис. 9, а) нахколит граничит с фазами мирабилита и декагидрата карбоната натрия и способен к совместному осаждению в неинвариантных точках трехкомпонентного уровня. При 25 °С фазовое равновесие нахколита изменяется. С повышением температуры от 0 до 50 °С наблюдается появление новой фазы - троны, что изменяет структуру диаграммы вышеупомянутой системы (рис. 9, б и в).

В результате нахколит начинает граничить с фазами мирабилита и троны, которые могут совместно осаждаться в точках трехкомпонентного уровня. Данные по растворимости в геометрических формах системы $\text{Na}_2\text{SO}_4 - \text{Na}_2\text{CO}_3 - \text{NaHCO}_3 - \text{H}_2\text{O}$ приведено при 50 °С. Изменение полученных данных по изотермам 0 и 25 °С. С повышением температуры от 0 до 25 °С растворимость нахколита возрастает с 6.49 до 9.31 % масс., а при повышении до 50 °С этот показатель достигает 12.70 %.

Сравнение изменений растворимости солей в неинвариантных точках (где три твердые фазы находятся в равновесии) затруднено, так как фазовый состав осадков меняется с повышением температуры: при 50 °С происходит дегидратация декагидрата сульфата натрия ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) и декагидрата карбоната натрия декагидрати сульфата натрия ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$), а также декагидрата карбоната натрия ($\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) с переходом в тенардит (Na_2SO_4) и моногидрат карбоната натрия ($(\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O})$), равновесные твердые фазы: трона ($\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{NaHCO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) и беркеит ($\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 2\text{Na}_2\text{SO}_4$).

Следовательно, при перекристаллизации маточного раствора четырехкомпонентной системы (состоящей из сульфатов, карбонатов и гидрокарбонатов натрия) можно выделить 6.21 г нахколита NaHCO_3 , так как его растворимость 25 и 0 °С составляет 12.7 и 9.31 г, соответственно. В результате перекристаллизации осаждается и отделяется 3.16 г NaHCO_3 .

Пример 1. В качестве объекта исследования использовалась навеска маточного раствора технического сырья массой 25 кг. Солевой состав системы представлен сульфатами, карбонатами и гидрокарбонатами натрия. Начальная стадия переработки осуществлялась при температуре около 0 °С в течение 45 минут с применением щелочных растворов, полученных по стандартной методике. В процессе концентрирования (упаривания) системы производилось отделение насыщенного щелочного экстракта от нерастворимого остатка (н.о.). Полученный горячий остаток массой 13,4725 кг характеризовался следующим содержанием компонентов (в масс. %): Na^+ - 19,4936; SO_4^{2-} - 14,8176; CO_3^{2-} - 12,8488; HCO_3^- - 6,7608 н.о. 11,5225 и вода до 100 %. Дальнейшая технологическая операция заключалась в охлаждении системы в температурном интервале от 25 до 0 °С в течение 100 минут. Для повышения чистоты целевых продуктов применялась промывка этиловым спиртом с последующей фильтрацией. В результате было получено 13,4775 кг щелочного раствора, имеющего следующий состав (в масс. %): Na^+ - 5,9896; SO_4^{2-} - 2,9068; CO_3^{2-} - 3,6792; HCO_3^- - 4,7128, остальное – вода. Масса выделенного твердого осадка составила 9,155 кг. Согласно данным фазового анализа, минеральная ассоциация осадка представлена преимущественно нахколитом, мирабилитом и десятиводным карбонатом натрия. Полученный после разделения фаз фильтрат возвращался в основной производственный цикл для повторного использования. Суммарный коэффициент извлечения нахколита из щелочного раствора при данных параметрах составил 51,10 %

Пример 2. В качестве объекта исследования использовалась проба маточного раствора технического сырья массой 25 кг, содержащего сульфаты, карбонаты, гидрокарбонаты натрия. Первичная обработка проводилась по установленной методике при температуре около 25 °С в течение 45 минут. В процессе упаривания (сгущения) системы насыщенный щелочной раствор отделялся от осадка. Полученный нагретый остаток массой 19,15 кг имел следующий химический состав (в масс. %): Na^+ - 27,7084; SO_4^{2-} - 21,4984; CO_3^{2-} - 18,1696; HCO_3^- - 9,2224, нерастворимый осадок 5,85 кг и вода - остальное до 100 %. Данный остаток подвергался водной обработке (5,6725 кг воды) в условиях постепенного снижения температуры от 50 до 25 °С в течение 100 минут. Последующая очистка раствора этиловым спиртом и фильтрация позволили выделить 13,4775 кг щелочного экстракта со следующим содержанием компонентов (в масс. %): Na^+ - 19,4936; SO_4^{2-} - 14,8176; CO_3^{2-} - 12,8488; HCO_3^- - 6,7608 и 5,6725 вода, также 5,68 кг нерастворимые осадки. Согласно данным фазового анализа, минеральный состав осадка представлен преимущественно ассоциацией нахколита, троны, мирабилита и десятиводного карбоната натрия. Полученный фильтрат был возвращен в технологический цикл производства. Суммарный коэффициент извлечения нахколита из щелочного раствора составил 62,40 %.

Пример 3. Экспериментальному исследованию подвергалась проба маточного раствора технического сырья массой 25 кг, содержащего сульфаты, карбонаты и гидрокарбонаты натрия. Термическая обработка проводилась при температуре порядка 50 °С в течение 45 минут по установленной методике. Последующее концентрирование (сгущение) раствора позволило отделить насыщенный щелочной экстракт от твердой фазы. Полученный горячий остаток массой 19,15 кг имел следующий элементный состав (в масс. %): Na^+ - 27,7084; SO_4^{2-} - 21,4984; CO_3^{2-} - 18,1696; HCO_3^- - 9,2224, нерастворимый остаток - 5,85 кг; вода - остальное. Далее, образец подвергался воздействию 14,8275 кг воды в режиме снижения температуры от 50 до 0 °С (экспозиция 100 минут). После очистки этанолом и фильтрации было получено Na^+ - 5,9896; SO_4^{2-} - 2,9068; CO_3^{2-} - 3,6792; HCO_3^- - 4,7128 и 20,6775 вода, также 2,9610 кг нерастворимый осадок. В результате фазовых превращений твердая фаза представлена преимущественно нахколитом, мирабилитом и десятиводным карбонатом натрия. Фильтрат подлежит возврату в производственный цикл. Суммарный выход нахколита из щелочного раствора составил 73,30 %.

Предлагаемая методика значительно упрощает технологию переработки натрийсодержащего полиминерального сырья. Оптимизация достигнута за счет исключения из технологического цикла операций принудительного охлаждения нерастворимого остатка отработанным щелочным раствором, а также стадии промывки нахколита в рамках четырехкомпонентной системы.

На основании сконструированных фазовых диаграмм предложена для кристаллизации химических продуктов алюминиевого производства из жидких промышленных отходов принципиальная технологическая схема. Фазовый комплекс четырехкомпонентного состава: H_2O - 5Na^+ - SO_4^{2-} - CO_3^{2-} - HCO_3^- описывает систему. Интерпретация графика (рис. 18) показывает термодинамическое состояние системы. Одна фаза находится в равновесии в дивариантных полях. Две фазы сосуществуют на моновариантных линиях. Равновесие трех фаз наблюдается в нонвариантных точках. Данная схема позволяет эффективно выделять целевые продукты (мирабилит, соду и нахколит), которые благодаря своей широкой востребованности в промышленности могут быть возвращены в производственный оборот в рамках ресурсосберегающих технологий.

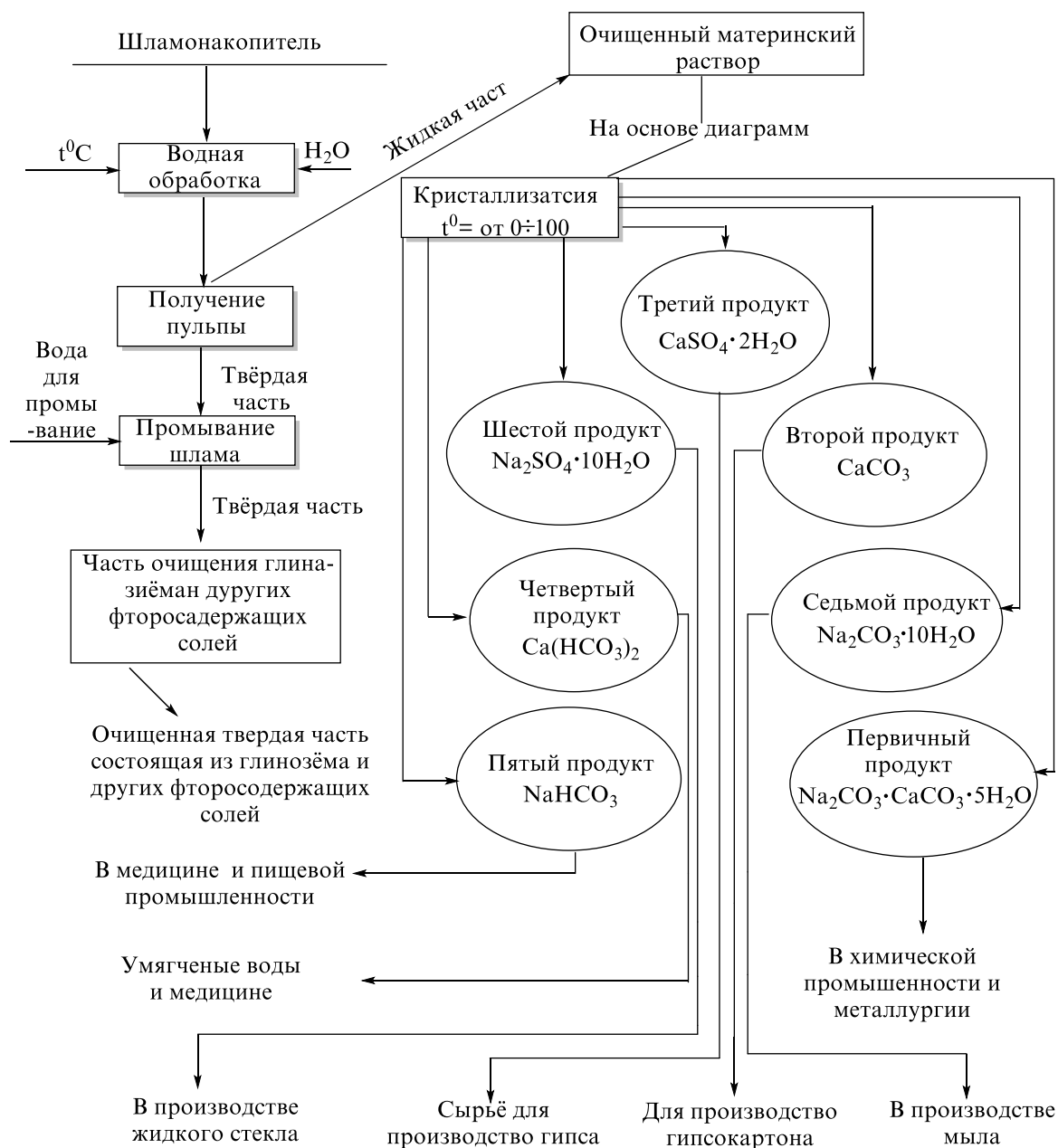


Рисунок 18. – Принципиальная технологическая схема процесса кристаллизации отдельных твердых фаз в системе $H_2O-5Na^+-SO_4^{2-} - CO_3^{2-} - HCO_3^-$

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Предложенный, усовершенствованный метод исследования многокомпонентных водно-солевых систем включает: а) прогнозирование фазового равновесия в многокомпонентных системах, основанное на трансляции структурных выражений подсистем, состоящих из n компонентов, в область общей системы, состоящей из $n+1$ компонента; б) построение диаграмм фазового комплекса многокомпонентных систем, в которых представлены все возможные фазовые равновесия в геометрических формах и их взаимное расположение [11-A], [13-A], [15-A], [19-A], [29-A], [30-A], [36-A], [37-A], [38-A], [46-A], [68-A], [82-A], [85-A], [86-A], [99-A], [101-A].

2. Применение данного метода доказано получением достоверных теоретических и экспериментальных результатов 25 изотерм фазовых комплексов четырехкомпонентных систем: $5Na^+-SO_4^{2-}-CO_3^{2-}-HCO_3^--H_2O$; $3Ca^{2+}-SO_4^{2-}-CO_3^{2-}-2HCO_3^--H_2O$; $Na^+, Ca^{2+}||SO_4^{2-}, CO_3^{2-}-H_2O$; $Na^+, Ca^{2+} || SO_4^{2-}, HCO_3^--H_2O$; $Na^+, Ca^{2+} || CO_3^{2-}, HCO_3^--H_2O$ и 5 изотерм

пятикомпонентной системы $\text{-Na}^+, \text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}, \text{CO}_3^{2-}, \text{HCO}_3^- \text{-H}_2\text{O}$ [5-A], [6-A], [7-A], [9-A], [10-A], [12-A], [47-A], [50-A], [51-A], [55-A], [57-A], [63-A], [64-A], [70-A], [80-A], [81-A], [90-A], [93-A], [96-A], [97-A].

3. Впервые экспериментально выявлено, что увеличение числа геометрических форм с повышением температуры от 0 до 100 °С связано с признаками реакциями химического обмена и появлением новых равновесных фаз систем, что согласуется с основными принципами физико-химического анализа и правилом фаз Гиббса [8-A], [31-A], [32-A], [39-A], [40-A], [41-A], [49-A], [54-A], [67-A], [74-A], [83-A], [92-A], [102-A].

4. Сложные поликомпонентные системы, включающие катионы кальция и натрия, а также анионы гидрокарбонатов, карбонатов и сульфатов могут быть изучены методом трансляции с предложенным нами упрощением построения диаграмм фазового комплекса по фрагментам. При этом, фрагментация осуществляется по областям кристаллизации одной из твердых фаз на уровне четырехкомпонентного или двух фаз - пятикомпонентного составов [33-A], [35-A], [43-A], [44-A], [45-A], [46-A], [53-A], [84-A], [87-A], [100-A], [103-A], [112-A].

5. Установлены общие закономерности структуры диаграмм фазового комплекса многокомпонентных водно-солевых систем: а) невариантные точки в основном образуются от пересечения моновариантных кривых, которые берут начало из невариантных точек одноименных фаз (*сквозная трансляция*). В меньшей степени они возникают при пересечении моновариантных кривых. Моновариантная кривая может исходить из невариантной точки подсистем (*односторонняя трансляция*). Такая же моновариантная кривая может проходить между двумя невариантными точками общей системы. Может быть ещё другой вариант, невариантные точки образуются при пересечении моновариантных кривых (*промежуточные точки*); б) моновариантные кривые возникают при трансляции невариантных точек подсистем в область общего состава или в меньшей степени при пересечении дивариантных полей в область общего состава системы; в) дивариантные поля формируются, когда моновариантные кривые подсистем транслируются в область общего состава. Редко они возникают при трансляции моновариантных кривых в одноименные подсистемы между невариантными точками. Кроме того, моновариантные кривые могут проходить только в область общего (n + 1) компонентного состава [1-A], [2-A], [3-A], [22-A], [23-A], [48-A], [58-A], [60-A], [65-A], [66-A], [69-A], [71-A], [98-A], [104-A], [108-A], [111-M], [117-M].

6. На основе данных о структуре изотерм фазового равновесия и путях кристаллизации в водно-солевых системах, а также информации, описывающей математическое моделирование материального потока процесса, были разработаны следующие методы оптимизации технологических узлов переработки полиминерального сырья из жидких отходов алюминиевого производства: получение декагидрата карбоната натрия; способ получения нахколита и виломита [4-M], [56-M], [61-M], [72-M], [73-M], [75-M], [76-M], [77-M], [78-M], [79-M], [94-M], [107-M], [113-M], [115-M], [116-M], [118-M].

7. Методом растворимости были исследованы и построены диаграммы состояния пяти следующих систем в интервале 0-100 °С: $5\text{Na}^+ \text{-SO}_4^{2-} \text{-CO}_3^{2-} \text{-HCO}_3^- \text{-H}_2\text{O}$; $3\text{Ca}^{2+} \text{-SO}_4^{2-} \text{-CO}_3^{2-} \text{-2HCO}_3^- \text{-H}_2\text{O}$; $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}, \text{CO}_3^{2-} \text{-H}_2\text{O}$; $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}, \text{HCO}_3^- \text{-H}_2\text{O}$; $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+} \parallel \text{CO}_3^{2-}, \text{HCO}_3^- \text{-H}_2\text{O}$, а также диаграмма пятикомпонентной системы $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}, \text{CO}_3^{2-}, \text{HCO}_3^- \text{-H}_2\text{O}$ при 0 °С. Достоверность полученных экспериментальных данных подтверждена методами химического, кристаллооптического и рентгенофазового анализов и полностью согласуются с данными, полученными методом трансляции [14-M], [16-M], [17-M], [18-M], [20-M], [21-M], [24-M], [25-M], [26-M], [27-M], [28-M], [33-M], [38-M], [42-M], [52-M], [59-M], [62-M], [88-M], [89-M], [91-M], [95-M], [105-M], [106-M], [109-M], [110-M], [113-M], [114-M].

Рекомендации по практическому использованию результатов исследования

Химическая промышленность занимается переработкой минерального сырья и производством новейших материалов с заранее заданными свойствами. Поэтому развитие этой промышленности неразрывно связано с исследованием различных простых и сложнейших систем. Поликомпонентная химическая система Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, CO_3^{2-} , HCO_3^- - H_2O (пятикомпонентная) является одной из составной части сложной шестикомпонентной системы Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, CO_3^{2-} , HCO_3^- , F^- - H_2O . Условия утилизации жидких отходов алюминиевого производства определяются фазовыми комплексами этой системы. Жидкие отходы алюминиевого завода содержат сульфаты натрия и кальция, а также их фториды, карбонаты, гидрокарбонаты. В водных растворах этих отходов определяются процессы кристаллизации и растворимости солей. Таким образом выявляются результаты исследования политермы растворимости и фазового комплекса водно-солевой взаимной системы Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, CO_3^{2-} , HCO_3^- - H_2O и структуры ее диаграммы позволяют: фрагментировать область кристаллизации 15 отдельных фаз в заданных условиях; определить топологические свойства геометрических выражений, характерных для составляющих подсистем; на основании этих свойств выделять одну фазу при обработке в полях четырехкомпонентного уровня и две фазы - на пятикомпонентном уровне; установить равновесные концентрации в жидкой фазе при отдельной кристаллизации (для полей) и при совместной кристаллизации (для линий и точек).

На основании данных о структуре изотерм фазового равновесия и путях кристаллизации в водно-солевых системах, а также информации о математическом описании процесса, могут быть применены следующие методы оптимизации технологических узлов переработки полиминерального сырья (производственных отходов): методы получения декагидрата карбоната натрия, нахколита и виломита из жидких отходов алюминиевого производства.

ПЕРЕЧЕНЬ НАУЧНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Монография:

[1-М]. Солиев, Л. Строение фазового комплекса и растворимость водно-солевой системы из сульфатов, карбонатов, гидрокарбонатов натрия и кальция / Л. Солиев, **М.Т. Жумаев**. Монография (Книга 1). - Душанбе: Балогат, -2020. -212 с. ISBN 978-99975-79-12-6.

[2-М]. Солиев, Л. Строение фазового комплекса и растворимость водно-солевой системы из сульфатов, карбонатов, гидрокарбонатов натрия и кальция / Л. Солиев, **М.Т. Жумаев**. Монография (Книга 2). --Душанбе: ТГПУ. -2023. -213 с. ISBN 978-99985-53-04-0.

[3-М]. Махмадов, Х.Р. Политерма фазового комплекса и растворимости системы Na , $\text{Ca} \parallel \text{SO}_4$, CO_3 - H_2O при $0 \div 100$ °C / Х.Р. Махмадов, **М.Т. Жумаев**, Л. Солиев. Монография. -Душанбе: Эр-Граф. -2025. -151 с. ISBN 978-99985-852-5-6.

Статьи, опубликованные в научных журналах, рекомендованных ВАК РТ и международных журналах:

[4-М]. Солиев, Л. Ҳалшавандагӣ дар системаи $\text{Na}_2\text{SO}_4\text{-K}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}$ дар ҳарорати 50 °C / Л. Солиев, Ш.Ҳ. Авлоев, **М.Т. Жумаев** // Паёми донишгоҳи омӯзгорӣ. Баҳши илмҳои табиӣ. -2009. -№ 2(34). -С.155-157.

[5-М]. Солиев, Л. Фазовые равновесия системы Na , $\text{Ca} \parallel \text{SO}_4$, HCO_3 - H_2O при 25 °C / Л. Солиев, **М.Т. Жумаев**, Ш.Х. Авлоев, В. Нури // Вестник Таджикского национального университета. Серия естественных наук -2012. -№ 1/3 (85). -С. 202-205.

- [6-М]. Солиев, Л. Фазовые равновесия системы Na, Ca // CO_3 - HCO_3 - H_2O при 25 °C / Л. Солиев, **М.Т. Жумаев**, Г. Икбол, И.М. Низомов // ДАН Республики Таджикистан. -2012. -Т.55. -№ 3. -С. 220-224.
- [7-М]. Солиев, Л. Фазовые равновесия системы Na, Ca // CO_3 , HCO_3 - H_2O при 0 °C / Л. Солиев, **М.Т. Жумаев**, Ш.Х. Авлоев, Г. Икбол // Вестник Таджикского национального университета. Серия естественных наук. -2013. -№ 1/1 (102). -С. 151-154.
- [8-М]. Солиев, Л. Определение фазовых равновесий системы Na, Ca // HCO_3 , CO_3 - H_2O при 0 и 25 °C / Л. Солиев, **М.Т. Жумаев**, Ш.Х. Авлоев, Г. Икбол. Вестник педагогического университета. Серия естественных наук. -2013. -№ 3 (52). -С. 60-64.
- [9-М]. Солиев, Л. Фазовые равновесия системы CaSO_4 - CaCO_3 - $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ - H_2O при 25 °C / Л. Солиев, **М.Т. Жумаев**, Ш.Х. Авлоев // Вестник Таджикского национального университета. Серия естественных наук. -2013. -№1/2 (106). -С. 178-181.
- [10-М]. Солиев, Л. Фазовые равновесия системы Na, Ca // SO_4 , CO_3 - H_2O при 50 °C / **Л.Солиев, М.Т. Жумаев**, М.Б. Усмонов // Вестник национального университета. Серия естественных наук. -2014. -№ ¼ (153). -С. 190-195.
- [11-М]. Солиев, Л. Строение диаграмм фазовых равновесий четырёхкомпонентных взаимных систем, составляющих шестикомпонентную систему Na, Ca // SO_4 , CO_3 , HCO_3 , F - H_2O при 25 °C / Л. Солиев, **М.Т. Жумаев**, М.Б. Усмонов, В. Нури, И. Гулом // Вестник национального университета. Серия естественных наук. - 2014. -№ ¼ (153). -С. 195-199.
- [12-М]. Солиев, Л. Фазовые равновесия системы CaSO_4 - CaCO_3 - $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ - H_2O при 0 °C / Л. Солиев, **М.Т. Жумаев**, Ш.Х. Авлоев // ДАН Республики Таджикистан. - 2014. -Т.57. -№ 8. -С. 671-675.
- [13-М]. Солиев, Л. Фазовые равновесия системы Na, K // SO_4 , CO_3 , HCO_3 , F- H_2O при 0 °C в области кристаллизации виломита / Л. Солиев, И.М. Низомов, **М.Т. Жумаев**, Гулом И. // Вестник национального университета. Серия естественных наук. -2015. - №1/1(156). -С. 132-136.
- [14-М]. Солиев, Л. Растворимость системы CaSO_4 - CaCO_3 - $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ - H_2O при 0 °C / Л. Солиев, **М.Т. Жумаев**, Ш.Х. Авлоев // ДАН Республики Таджикистан. -2015. - Т.58. -№2. -С. 139-144.
- [15-М]. Солиев, Л. Фазовые равновесия системы Na, Ca // CO_3 , HCO_3 , F - H_2O при 0 °C / Л. Солиев, **М.Т. Жумаев**, И.М. Низомов, И. Гулом // Вестник национального университета. Серия естественных наук. -2015. -№1/1(156). -С. 136-142.
- [16-М]. Солиев, Л. Растворимость системы CaSO_4 - CaCO_3 - $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ - H_2O при 25 °C / Л. Солиев, **М.Т. Жумаев**, Ш.Х. Авлоев // Вестник национального университета. Серия естественных наук. -2015. -№1/6 (19). -С. 110-116.
- [17-М]. Солиев, Л. Растворимость в системе Na, Ca // SO_4 , CO_3 - H_2O при 25 °C / Л. Солиев, **М.Т. Жумаев**, М.Б. Усмонов, И.М. Низомов // Журнал неорганической химии РАН. -2016. -Т 61. -№ 5. -С. 683-688.
- [18-М]. Soliev, L. Solubility in the Na, Ca // SO_4 , CO_3 - H_2O system at 25 °C / L. Soliev, **М.Т. Jumaev**, M.B. Usmonov, I.M. Nizomov // Russian Journal at Inorganic Chemistry. - 2016. -Vol. 61. -№ 5. -PP. 651-655.
- [19-М]. Солиев, Л. Диаграммы фазовых равновесий четырёхкомпонентных взаимных систем, составляющих шестикомпонентную систему Na, Ca // SO_4 , CO_3 , HCO_3 , F- H_2O при 25 °C / Л. Солиев, **М.Т. Жумаев**, М. Усмонов, В. Нури, И. Гулом // Вестник Таджикского национального университета. Серия естественных наук. -2016. -№ 1/4(2016). -С. 213-216.
- [20-М]. Солиев, Л. Растворимость в системе Na, Ca // SO_4 , CO_3 - H_2O при 0 °C / Л. Солиев, **М.Т. Жумаев**, М.Б. Усмонов // Журнал неорганической химии РАН. -2016. -Т. 61. -№ 8. -С. 1093-1099.
- [21-М]. Soliev, L. Solubility in the Na, Ca // SO_4 , CO_3 - H_2O system at 0 °C / L. Soliev, **М.Т. Jumaev**, M. Usmonov // Russian Journal at Inorganic Chemistry. -2016. -Vol.61. -№ 8. - PP. 1041-1046.

- [22-М]. Soliev, L. Structure of solubility diagram of the quaternary Na, Ca // SO_4 , CO_3 - H_2O water-salt system at 25 °C / L. Soliev, **М.Т. Жумаев**, Sh. Tursunbadalov, M. Usmonov, Sh. Avloev // Austrian journal of Technical and Natural Sciences. -2016. -№ 9-10. -PP. 83-90.
- [23-М]. Солиев, Л. Фазовые равновесия системы CaSO_4 - CaCO_3 - CaF_2 - H_2O при 50 °C / Л. Солиев, **М.Т. Жумаев**, М. Усмонов, П. Мухторов // Международный научный журнал «Символ науки». -2017. -№ 10. -С. 9-12.
- [24-М]. Солиев, Л. Растворимость системы Na_2SO_4 - Na_2CO_3 - NaHCO_3 - H_2O при 50 °C / Л. Солиев, **М.Т. Жумаев**, Р.О. Тураев, Х.Р. Махмадов // Химический журнал Казахстана. -2017. -№ 4 (60). -С. 29-35.
- [25-М]. Солиев, Л. Растворимость в системе Na, Ca // CO_3 , HCO_3 - H_2O при 25 °C / Л. Солиев, **М.Т. Жумаев**, И. Гулом, Б.Б.Джабборов // Журнал неорганической химии РАН. -2017. -Т. 62. -№ 9. -С. 1254-1259.
- [26-М]. Soliev, L. Solubility in the Na, Ca // CO_3 , HCO_3 - H_2O system at 25 °C / L. Soliev, **М.Т. Жумаев**, I. Gulom, B. Dzhabborov // Russian Journal at Inorganic Chemistry. -2017. -Vol.62. -№ 9. -PP. 1245-1251.
- [27-М]. Солиев, Л. Растворимость системы Na_2SO_4 - Na_2CO_3 - NaHCO_3 - H_2O при 0 °C / Л. Солиев, **М.Т. Жумаев**, Р.О. Тураев // ДАН Республики Таджикистан. -2017. -Т.60. -№ 9. -С. 430-435.
- [28-М]. Soliev, L. Solubility and phase equilibria in the Na, Ca // CO_3 , HCO_3 - H_2O system at 0 °C / L. Soliev, **М.Т. Жумаев**, B. Dzhabborov // Chimica Techno Acta. -2017. -Vol.4. -№ 3. -PP. 191-201.
- [29-М]. Солиев, Л. Фазовые равновесия в системе Na, Ca // SO_4 , Cl - H_2O при 25 °C / Л. Солиев, **М.Т. Жумаев**, А. Тошов, А. Холмуродов // Вестник Таджикского национального университета. Серия естественных наук. -2017. -№ 1/3. -С. 218-221.
- [30-М]. Солиев, Л. Растворимости системы K_2SO_4 - K_2CO_3 - KHCO_3 - H_2O при 0 °C / Л. Солиев, **М.Т. Жумаев**, Б.М. Иброгимова // Химический журнал Казахстана. -2018. -№3(63). -С. 107-113.
- [31-М]. Soliev, L. Structure of the solubility diagram in the Na_2SO_4 - Na_2CO_3 - NaHCO_3 - H_2O system at 0, 25 and 50 °C / L. Soliev, **М.Т. Жумаев**, H.R. Makhmadov, B.B. Dzabborov // Chimica Techno Acta. -2018. -Vol. 5. -№ 2. -PP. 104-108.
- [32-М]. Soliev, L. Solubility in the Quaternary CaSO_4 - CaCO_3 - CaF_2 - H_2O System at 50 °C / L. Soliev, **М.Т. Жумаев**, P. Mukhtorov, Sh. Tursunbadalov, M. Usmonov // Inorganic Chemistry – An Indian Journal. -2018. -Vol. 13. -№ 1. -PP. 124-128.
- [33-М]. Солиев, Л. Растворимость в системе Na, Ca // SO_4 , HCO_3 - H_2O при 0 °C / Л. Солиев, **М.Т. Жумаев**, А. Варкаева, Д. Музафарова // Доклады Академии наук Республики Таджикистан, -2018. -Т. 61. -№ 11-12. -С. 862-868.
- [34-М]. Soliev, L. Phase equilibrium of Na, Ca // SO_4 , HCO_3 - H_2O systems at 0 °C / L. Soliev, **М.Т. Жумаев**, B.B. Jabborov, R.O. Turaev // East European Science Journal. -2018. Vol. 33. -№5-2. PP. 55-57.
- [35-М]. Soliev, L. Phase equilibrium of Na, Ca // SO_4 , CO_3 , HCO_3 - H_2O systems at 50 °C / L. Soliev, **М.Т. Жумаев** // Applied Solid State Chemistry. -2018. -№ 4(5). -PP. 192-198.
- [36-М]. Soliev, L. Phase equilibria in the System Na, Ca // SO_4 , CO_3 , HCO_3 - H_2O at 0 °C / L. Soliev, **М.Т. Жумаев** // Chimica Techno Acta. -2019. -Vol.6. -№1. -PP. 24-30.
- [37-М]. Солиев, Л. Растворимость в системе Na, Ca // SO_4 , F - H_2O при 50 °C / Л. Солиев, **М.Т. Жумаев**, М.Б. Усмонов, П.А. Мухторов // Узбекский химический журнал. -2019. -№5. -С. 15-21.
- [38-М]. Soliev, L. Solubility in the system Na, Ca // SO_4 , CO_3 - H_2O at 50 °C / L. Soliev, **М.Т. Жумаев**, H.R. Makhmadov // Russian Journal of Inorganic Chemistry. -2019. -Vol.64. -№ 2. -PP. 270-276.
- [39-М]. Солиев, Л. Растворимость в системе K_2SO_4 - K_2CO_3 - KHCO_3 - H_2O при 25 °C / Л. Солиев, **М.Т. Жумаев**, Б.М. Иброгимова // Политехнический вестник. Серия инженерные исследования. -2019. -№1(45). -С. 121-126.

- [40-M]. Soliev, L. Comparative analysis of phase complex systems Na, Ca || SO₄, CO₃ – H₂O about 50 and 75 °C / L. Soliev, M.T. Jumaev, Kh.R. Makhmadov, D. Muzafarova // American Scientific Journal. -2019. -Vol, 28. -№ 2. -PP. 49-55.
- [41-M]. Солиев, Л. Таҳлили муқоисавии сохтори комплекси фазагии системаи Na₂SO₄-Na₂CO₃-NaHCO₃-H₂O дар ҳарорати 75 ва 100 °C / Л. Солиев, **М.Т. Жумаев**, Р.О. Тураев, Ҳ.Р. Махмадов, Н.В. Олимҷонова // Паёми донишгоҳи милли Тоҷикистон. Бахши илмҳои табиӣ. -2019. -№2. -С. 179-184.
- [42-M]. Soliev, L. Solubility in the Na, Ca || SO₄, HCO₃ - H₂O system at 25 °C / L. Soliev, **М.Т. Жумаев**, M. Varkaeva, H.R. Makhmadov // Chimica Techno Acta. -2019. -Vol.6. -№ 4. -PP. 130-137.
- [43-M]. Солиев, Л. Фазовый комплекс системы Na, Ca || SO₄, CO₃, HCO₃ – H₂O при 25 °C / Л. Солиев, **М.Т. Жумаев** // Химический журнал Казахстана. -2020. -№1(69). -С. 72-82.
- [44-M]. Солиев, Л. Фазовый комплекс системы Na, Ca || SO₄, CO₃, HCO₃ - H₂O при 75 °C / Л. Солиев, **М.Т. Жумаев**, И.М. Низомов // Узбекский химический журнал. -2020. -№ 5. -С. 16-24.
- [45-M]. Soliev, L. Phase complex of the system Na, Ca || SO₄, CO₃, HCO₃-H₂O at 100 °C / L. Soliev, **М.Т. Жумаев** // Chimica Techno Acta. -2020. -Vol.7. -№2. -PP. 71-80.
- [46-M]. Солиев, Л. Фазовый комплекс системы Na, Mg, Ca || SO₄, CO₃ - H₂O при 0 °C / Л. Солиев, **М.Т. Жумаев**, Б. Джабборзода // Химический журнал Казахстана. -2020. -№ 4(72). -С. 97-104.
- [47-M]. Солиев, Л. Строение фазового комплекса системы Na₂SO₄-K₂SO₄-MgSO₄-CaSO₄-H₂O при 0 °C / Л. Солиев, **М.Т. Жумаев** // ДАН Республики Таджикистан. -2020. -Т. 63. -№1-2. -С. 89-97.
- [48-M]. Солиев, Л. Диаграмма фазовый комплекс системы Na, Ca || SO₄, CO₃, HCO₃ - H₂O при 50 °C / Л. Солиев, **М.Т. Жумаев** // Известия НАН Республики Таджикистан. -2020. -№ 3(180). -С. 104-113.
- [49-M]. Солиев, Л. Фазовый комплекс взаимной системы Na, Ca || SO₄, CO₃ - H₂O при 75 и 100 °C / Л. Солиев, **М.Т. Жумаев**, Х.Р. Махмадов, Д.З. Музафарова // ДАН Республики Таджикистан. -2020. -Т.63. -№ 9-10. -С. 618-625.
- [50-M]. Солиев, Л. Мувозинатҳои фазагии системаи K₂SO₄-K₂CO₃-KHCO₃-KF-H₂O дар ҳарорати 0 °C / Л. Солиев, **М.Т. Б.М. Ибрагимова, Жумаев, И.М. Низомов** // Паёми донишгоҳи милли Тоҷикистон. Бахши илмҳои табиӣ. -2020. -№ 4. -С. 277-285.
- [51-M]. Солиев, Л. Строение фазового комплекса системы K, Mg, Ca || SO₄, Cl - H₂O при 0 °C / Л. Солиев, **М.Т. Жумаев**, И.О. Фрицкий // Химический журнал Казахстана. -2021. -№ 1(73). -С. 142-150.
- [52-M]. Солиев, Л. Растворимость системы Na₂SO₄-Na₂CO₃-NaHCO₃-H₂O при 75 °C / Л. Солиев, **М.Т. Жумаев**, Р.О. Тураев // Известия НАН Республики Таджикистан. -2021. -№ 1(182). -С. 82-89.
- [53-M]. Солиев, Л. Сохтори диаграммаи мувозинатҳои фазагии системаи Na, Ca || SO₄, CO₃, HCO₃ - H₂O дар ҳарорати 100 °C / Л. Солиев, **М.Т. Жумаев** // Паёми политехникӣ. Бахши таҳқиқотҳои муҳандисӣ. -2021. -№ 2(54). -С. 49-56.
- [54-M]. Солиев, Л. Таҳлили муқоисавии диаграммаи ҳалшавандагии системаи Na, Ca || SO₄, CO₃ - H₂O дар ҳароратҳои 0, 25 ва 50 °C / Л. Солиев, **М.Т. Жумаев**, Ҳ.Р. Махмадов, Д.З. Музаффарова. Паёми донишгоҳи омӯзгорӣ. Бахши илмҳои табиӣ). -2021. -№ 1 (10-11). -С. 253-257.
- [55-M]. Солиев, Л. Строение фазового комплекса системы Na, K, Mg, Ca || SO₄, Cl – H₂O при 0 °C в области кристаллизации мирабилита (Na₂SO₄·10H₂O) / Л. Солиев, **М.Т. Жумаев** // Вестник педагогического университета. Серия естественных наук. -2021. -№ 1 (10-11). -С. 51-61.
- [56-M]. Солиев, Л. Дивариантние равновесия в многокомпонентных системах / Л. Солиев, **М.Т. Жумаев** // Химических журнал Казахстана. -2021. -№ 4(76). -С. 59-71.

- [57-М]. Солиев, Л. Прогнозирование фазового комплекса системы Na, Mg, Ca // SO_4 , CO_3 - H_2O при 0 °C / Л. Солиев, **М.Т. Жумаев**, Б. Джабборзода // Вестник педагогического университета. Серия естественных наук. -2021. -№ 1(10-11). -С. 242-247.
- [58-М]. Солиев, Л. Фазовый комплекс системы Na_2SO_4 - CaSO_4 - $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ - H_2O при изотерме 298 К / Л. Солиев, **М.Т. Жумаев**, Д.З. Музафарова // Политехнический вестник. Серия инженерная исследования. -2021. -№ 3(55). -С. 45-49.
- [59-М]. Солиев, Л. Растворимость в системе K_2SO_4 - KHCO_3 - KF - H_2O при 0 °C / Л. Солиев, **М.Т. Жумаев**, Б.М. Ибрагимова. Доклады НАН Таджикистана. -2022. -Т. 65. - № 5-6. -С. 366-372.
- [60-М]. Солиев, Л. Комплексы фазации системаи K_2SO_4 - K_2CO_3 - KHCO_3 - KF - H_2O дар харорати 25 °C / Л. Солиев, **М.Т. Жумаев**, Б.М. Ибрагимова // Паёми донишгоҳи омӯзгорӣ. Бахши илмҳои табиатшиносӣ. -2021. -№ 1(10-11). -С. 247-253.
- [61-М]. Soliev, L. Formation of invariant equilibrium in multicomponent systems and determination of solid phase crystallization pathway / L. Soliev, **М.Т. Jumaev**, I.M. Nizomov, Kh.R. Makhmadov, N.V. Olimjonova, D.V. Muzafarova // Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. -2022. -PP.35-43.
- [62-М]. Солиев, Л. Изотерма растворимости системы Na, Ca // SO_4 , CO_3 - H_2O при 50 °C / Л. Солиев, **М.Т. Жумаев**, Х.Р. Махмадов, Д. Музафарова // Вестник таджикского национального университета. Серия естественных наук. -2022. -№ 3. -С. 123-130.
- [63-М]. Солиев, Л. Строение фазового комплекса системаи KCl - MgCl_2 - CaCl_2 - H_2O при 0 °C / Л. Солиев, **М.Т. Жумаев** // Вестник технологического университета. -2022. -№ 2(49). -С. 30-35.
- [64-М]. Солиев, Л. Фазовый комплекс системы Na_2SO_4 - CaSO_4 - $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ - H_2O при 25 °C / Л. Солиев, **М.Т. Жумаев**, Д. Музафарова // Известия НАН Таджикистана. -2023. - № 1(190). -С. 40-46.
- [65-М]. Музафарова, Д.З. Фазообразование в системе Na, Ca, Al // SO_4 , CO_3 - H_2O при 273 К / Д.З. Музафарова, **М.Т. Жумаев**, Л. Солиев // Доклады НАН Таджикистана. - 2023. -Т. 66. -№ 3-4. -С. 223-230.
- [66-М]. Олимҷонова, Н.В. Фазообразование в системе Na, Ca, Al // SO_4 , HCO_3 - H_2O при 298 К / Н.В. Олимҷонова, **М.Т. Жумаев**, Л. Солиев // Известия НАН Таджикистана. -2023. -№ 2(191). -С. 223-230.
- [67-М]. Олимджонова, Н.В. Сравнение фазовых равновесий в системе Na_2SO_4 - CaSO_4 - $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ - H_2O при температурах 273 и 298 К / Н.В. Олимджонова, Д.З. Музафарова, **М.Т. Жумаев**, Л. Солиев // Вестник филиала московского государственного университета им. М.В.Ломоносова в городе Душанбе. Серия естественных наук. -2023. -Т.1. -№3(33). -С. 53-61.
- [68-М]. 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. -2024. -№ 1(65). -С. 108-111.
- [69-М]. Olimjonova, N.V. Phase formation in the system Na, Ca, Al // SO_4 , HCO_3 - H_2O at 273 K / N.V. Olimjonova, D.Z. Muzafarova, **М.Т. Jumaev**, Kh.R. Makhmadov, S. Sherzodi, I.M. Nizomov / Open Journal Systems (OJS). E3S Web of Conferences 592, 03020 (2024). EMMFT-2024.
- [70-М]. **Жумаев, М.Т.** Фазаҳосилшавӣ дар системаи Na^+ , Ca^{2+} // CO_3^{2-} , HCO_3^- - H_2O барои 348 К / **М.Т. Жумаев**, Л. Солиев // Паёми донишгоҳи омӯзгорӣ. Бахши илмҳои табиӣ. -2024. -№1(21). -С. 42-48.
- [71-М]. **Жумаев, М.Т.** Строение фазового комплекса системы Na_2SO_4 - K_2SO_4 - MgSO_4 - CaSO_4 - H_2O при 0 °C / **М.Т. Жумаев**, Дж.М. Мусоджонзода, Л. Солиев // -2024. - Доклады НАН Республики Таджикистан. -2024. -Т.67. -№3-4. -С. 204-210.
- [72-М]. **Жумаев, М.Т.** Параметрҳои консентратсионии ҳосилшавии фазаҳои сахти мувозинатии системаи Ca^{2+} - SO_4^{2-} - CO_3^{2-} - 2HCO_3^- - H_2O дар харорати 75 °C / **М.Т. Жумаев**, Ҷ.М. Мусочонзода, Л. Солиев // Паёми донишгоҳи технологии Тоҷикистон. -2024. - №2(57). -С.22-29.

[73-М]. Низомов, И.М. Фазовые равновесия системы Na, K // SO_4 , CO_3 , HCO_3 , F - H_2O в области кристаллизации виломита / И.М. Низомов, **М.Т. Жумаев**, Л. Солиев // Вестник педагогического университета. Серия естественных наук. -2024. -№ 2-3 (22-23). -С.72-78.

[74-М]. **Жумаев, М.Т.** Сравнение растворимости в системе Na, Ca // SO_4 , HCO_3 - H_2O при 273 и 298 К / **М.Т. Жумаев**, Н.В. Олимджонова, Д.З. Музафарова, Л. Солиев // Известия НАН Республики Таджикистан. -2024, -№4(197). -С. 85-92.

[75-М]. **Жумаев, М.Т.** Фазовый комплекс системы CaCO_3 - CaF_2 - $\text{Al}_4\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$ - TiO_2 . / **М.Т. Жумаев**, А.Ш. Муродиён, Н.Х. Шарифов // Известия НАН Республики Таджикистан. -2025. -№2 (199). -С. 103-109.

[76-М]. **Жумаев, М.Т.** Таҳлили фазаҳои кристаллизатсионии системаи H_2O - 2Na^+ - Ca^{2+} - $2\text{Al}(\text{SO}_4^{2-})_5$ барои 273 К / **М.Т. Жумаев**, Д.З. Музафарова, М. Рахимова, Л. Солиев // Паёми донишгоҳи омӯзгорӣ. Бахши илмҳои табиӣ. -2025. -№4(28). -С. 143-151.

Малый патент на изобретение:

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

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

[79-М]. Малый патент № TJ 1649 РТ. Способ получения очищенного оксида кремния (кварца) и борной кислоты / Э.Дж. Маматова, С.Г. Назарзода, Х.Р. Махмадов, И.М. Низомова, **М.Т. Жумаева**; патентообладатель – Маматов Э.Дж. -№ 2502091. Дата подачи заявки 22.04.2025. Зарегистрировано 14.11.2025.

Тезисы статей в материалах научных конференций:

[80-А]. **Жумаев, М.** Фазовые равновесия системы Na, Ca // SO_4 , CO_3 - H_2O при 0 °С / **М.Т. Жумаев**, Ш. Авлоев, Л. Солиев // Матер. Междунар. науч. теорет. конф, посвященная 60 – летию АН Респ. Таджикистан. -Душанбе. -2011. -С. 7-9.

[81-А]. Солиев, Л. Определение фазовых равновесий в системе Na, Ca // CO_3 , HCO_3 - H_2O / Л. Солиев, **М.Т. Жумаев**, И. Гулом, И. Низомов // Матер. Республ. конф. «Комплексообразование в растворах». —Душанбе. -2012. -С. 46-49.

[82-А]. Солиев, Л. Фазовые равновесия в невариантных точках системы Na, Ca // SO_4 , CO_3 , HCO_3 , F – H_2O при 25 °С на уровне четырёхкомпонентного состава / Л. Солиев, М. Усмонов, **М. Жумаев**, Н. Валентино, И. Гулом // Матер. III Междунар. конф. «Современные проблемы физической химии». -Донецк. -2013. -С. 199-200.

[83-А]. Солиев, Л. Строение диаграммы фазовых равновесий системы Na, Ca // SO_4 , HCO_3 - H_2O при 0 и 25 °С / Л. Солиев, **М.Т. Жумаев**, Ш.Х. Авлоев // Матер. Междунар. конф. «Экологически безопасные и ресурсосберегающие технологии и материалы». -Улан-Уде. -2014. -С. 226-228.

[84-А]. **Jumaev, M.T.** Phase balance in system Na, Ca // SO_4 , CO_3 , HCO_3 - H_2O at 0 °C / **M.T. Jumaev**, L. Soliev, Sh. Avloev // «European Science and Technology» Materials of the VII international research and practice conference. -Germany (Munich). -2014. -PP. 112-118.

[85-А]. Солиев, Л. Строение диаграмм фазовых равновесий четырёхкомпонентных систем с общим ионом, составляющих шестикомпонентную систему Na, Ca // SO_4 , CO_3 , HCO_3 , F - H_2O (изотерма 25 °С) / Л. Солиев, М. Усмонов, **М. Джумаев**, Н. Валентино, И. Гулом // Матер. Междунар. конф. «Теплофизические исследования и измерения при контроле качества веществ, материалов и изделий». —Душанбе-Тамбов. -2014. -С.390-393.

[86-А]. Солиев, Л. Равновесные твёрдые фазы четверных невариантных точек системы Na, Ca // SO_4 , CO_3 , HCO_3 , F - H_2O при 25 °С / Л. Солиев, М. Усмонов, **М. Джумаев**,

- С. Холмуродов, В. Нури, Г. Икбол // Матер. Всероссийской науч. конф. с международным участием «II Байкальский материаловедческий форум». -Улан-Уде. -2015. -С. 111-112.
- [87-А]. **Jumaev, M.T.** Phase equilibriums of Na, Ca // SO_4 , CO_3 , HCO_3 - H_2O system at 25 degrees celsius / **M.T. Jumaev**, L. Soliev, Sh. Avloev // «Global Science and Innovation» Materials of the III international scientific conference. -USA (Chicago). -2014. -PP. 17-22.
- [88-А]. Солиев, Л. Растворимости системы CaSO_4 - CaCO_3 - $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ - H_2O при 0 °C / Л. Солиев, **М.Т. Жумаев**, А.Ф. Тошов, З.П. Худоёрбекова // Сборник научных трудов по материалам VI Международной научно-практической конференции «Современные тенденции развития науки и технологий». -Белгород. -2015. -С. 28-31.
- [89-А]. Солиев, Л. Растворимости системы CaSO_4 - CaCO_3 - $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ - H_2O при 25 °C / Л. Солиев, **М.Т. Жумаев**, З.П. Худоёрбекова // Сборник статей Международной научно-практической конференции «Научные исследования и разработки в эпоху глобализации», - Киров. -2016. -С. 26-30.
- [90-А]. Солиев, Л. О фазовых равновесиях в системе Na, Ca // SO_4 , CO_3 - H_2O при 25 °C/ И. Борисов, М. Шолитов, **М. Джумаев**, А. Набиев // Материалы II Всероссийской молодежной конференции – школы с международным участием. «Достижения химии в агропромышленном комплексе». —Уфа. -2016. -С. 31-36.
- [91-А]. Солиев, Л. Строение диаграммы растворимости системы Na, Ca // SO_4 , CO_3 - H_2O при 0 °C. / Л. Солиев, **М.Т. Жумаев**, М. Усмонов, И. Низомов // Материалы XI Международного Курнаковского совещания по физико-химическому анализу в рамках XX Менделеевского съезда по общей и прикладной химии. -Воронеж. -2016. -С. 217-221.
- [92-А]. Солиев, Л. Изотермы растворимости и фазовых равновесий системы Na, Ca // SO_4 , CO_3 - H_2O при 0 и 25 °C. / Л. Солиев, **М.Т. Жумаев**, М. Усмонов, И. Низомов // Материалы Международной конференции «Термический анализ и калориметрии (RTAC)». - Санкт-Петербург. -2016. -С. 322-324.
- [93-А]. Солиев, Л. Строение диаграммы фазовых равновесий в системе Na, Ca // CO_3 , HCO_3 - H_2O при 25 °C / Л. Солиев, **М.Т. Жумаев**, Б. Джабборов // Матер. III Всероссийской науч. конф. с международным участием «II Байкальский материаловедческий форум». - Улан-Уде. -2017. -С. 149-152.
- [94-А]. Солиев, Л. Концентрационные параметры образования равновесных твёрдых фаз системы Na_2SO_4 - Na_2CO_3 - NaHCO_3 - H_2O при 50°C / Л. Солиев, **М.Т. Жумаев**, Р.О. Тураев, Х.Р. Махмадов // Материалы Всероссийской научной конференции с международным участием «III Байкальский материаловедческий форум». -Улан-Уде. - 2018. -С. 106-108.
- [95-А]. Солиев, Л. Растворимость системы Na, Ca // SO_4 , CO_3 – H_2O при 50 °C / Л. Солиев, **М.Т. Жумаев**, Х.Р. Махмадов, М.Б. Усмонов // Сборник тезисов XXI Менделеевского съезда по общей и прикладной химии. -Санкт–Петербург. -2019. -Т.3. - С. 146.
- [96-А]. Солиев, Л. Фазовые равновесия в четырёхкомпонентной системе Na, Ca // SO_4 , CO_3 – H_2O при 75 °C / Л. Солиев, **М.Т. Жумаев**, М.Б. Усмонов, Х.Р. Махмадов // Материалы IV-международной научной конференции «Вопросы физической и координационной химии». –Душанбе. -2019. -С. 359.
- [97-А]. Солиев, Л. Фазовые равновесия системы Na, Ca // SO_4 , CO_3 – H_2O при 0 °C / Л.Солиев, **М.Т. Жумаев** // Материалы XV Нумоновского чтения «Современное состояние химической науки и использование её достижений в народном хозяйстве Республики Таджикистан». –Душанбе. -2019. -С. 18.
- [98А]. Солиев, Л. Фазовые равновесия системы Na, Mg // SO_4 , CO_3 - H_2O при 25 °C / Л. Солиев, **М.Т. Жумаев**, Б. Джабборзода // Сборник статей по итогам междун. науч. практ. конф. –Стерлитамак. -2020. -С.118.
- [99-А]. Солиев, Л. Строение фазового комплекса системы Na, K, Mg, Ca // SO_4 , Cl – H_2O при 0 °C в области кристаллизации мирабилита ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) / Л. Солиев, **М.Т. Жумаев** // Сборник статей Респуб. науч. прак. конф. «Современное состояние и перспективы физико-химического анализа». -Душанбе. -2021. -С. 51-61.

[100-А]. Жумаев, М.Т. Равновесные твёрдые фазы четверных невариантных точек системы Na, Ca // SO_4 , CO_3 , HCO_3 - H_2O при 0 °С / М.Т. Жумаев, Л. Солиев, Х.Р. Махмадов, Н.В. Олимджонова // Всероссийский симпозиум и школа – конференция молодых ученых «Физико-химические методы в междисциплинарных экологических исследованиях». -Москва. -2021. -С. 262.

[101-А]. Жумаев М.Т. Определение фазовых равновесий в системе K_2SO_4 - KHCO_3 - KF - H_2O при 0 °С / М.Т. Жумаев, Л. Солиев, Б.М. Ибрагимова, Н.З.Ноибова // Матер. Междун. науч. прак. конф. «Современные проблемы металлургической промышленности» -Душанбе. -2021. -С. 150.

[102-А]. Жумаев М.Т. Строение диаграммы фазовых равновесий в системе Na, Ca // SO_4 , CO_3 , HCO_3 - H_2O при 0, 25, 50 °С / М.Т. Жумаев, Х.Р. Махмадов, Л. Солиев // Материалы всероссийской научной конференции с международным участием IV-Байкальский материаловедческий форум. -Улан Уде. -2022. -С. 75-76.

[103-А]. Жумаев, М.Т. Строение диаграм фазового комплекса системы Na, Ca // SO_4 , CO_3 , HCO_3 - H_2O при 100 °С / М.Т. Жумаев, Л. Солиев // Материалы Республиканской конференции «Современное состояние и перспективы физико-химического анализа». -Душанбе. -2023. -С. 200-205.

[104-А]. Жумаев, М.Т. Прогнозирование строения диаграмм фазового комплекса многокомпонентных систем / М.Т. Жумаев, Н.В. Олимджонова, Х.Р. Махмадов // Всероссийской симпозиум и школа-конференции молодых учёных «Физико-химические методы в междисциплинарных исследованиях». -Севастополь. -2023. -С. 278-280.

[105-А]. Жумаев, М.Т. Растворимость системы Na_2SO_4 - Na_2CO_3 - NaHCO_3 - H_2O при 75 °С / М.Т. Жумаев, Л. Солиев Л. // Материалы Междун. науч. прак. конф. «Развитие новых направлений в химии и химической технологии». -Душанбе. -2023. -С. 151-153.

[106-А]. Жумаев, М.Т. Изотермы растворимости и фазовых равновесий системы CaSO_4 - CaCO_3 - $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ - H_2O при 50 °С / М.Т. Жумаев, М. Рахимова, Л. Солиев // Сборник научных статей по итогам международной конференции «Химическая наука и образование, проблемы и перспективы развития». –Махачкала. -2024. -С.29-34.

[107-А]. Жумаев, М.Т. Сохтори диаграммаи системаи 3Ca^{2+} - SO_4^{2-} - O_3^{2-} - 2HCO_3^- - H_2O дар харорати 75 °С / М.Т. Жумаев, Л. Солиев // Маводи конференсияи байналмилалӣ илмӣ-амалӣ дар мавзуи «Нақши химия ва саноати химиявӣ дар саноатикунонии Тоҷикистон». –Душанбе. -2024. С. 64-69.

[108-А]. Жумаев, М.Т. Прогнозирование фазовых равновесий в системе Na, Ca, Al // SO_4 , HCO_3 - H_2O при 298 К / М.Т. Жумаев, Н.В. Олимджонова, Л. Солиев // Материалы IV Международной научной конференции «Вопросы физической и координационной химии». –Душанбе. -2024. -С. 349-353.

[109-А]. Жумаев, М.Т. Изучение растворимости системы Ca^{2+} , Na^+ // CO_3^{2-} , SO_4^{2-} – H_2O при 75 °С / М.Т. Жумаев, Х.Р. Махмадов, Д.Музафарова, Л. Солиев // XXII Менделеевский съезд по общей и прикладной химии. Сборник тезисов. –Сириус. -2024. -Том 6. -С.36.

[110-А]. 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 Нумановского чтения на тему: «Развитие фундаментальной и прикладной химии и её вклад в индустриализацию страны». –Душанбе. -2024. -С.63-66.

[111-А]. Жумаев, М.Т. Исследование многокомпонентных систем: проблемы и пути их решения. / М.Т. Жумаев, Л. Солиев // Материалы науч. прак. конф. «Современное состояние и перспективы физико-химического анализа». -Душанбе. -2025. -С.41-50.

[112-А]. Олимджонова, Н.В. Сравнение фазообразований в системе Na, Al // SO_4 , HCO_3 - H_2O при 273 и 298 К / Н.В. Олимджонова, М.Т. Жумаев, Л. Солиев // IX Междун. науч. прак. конф. «Булатовские чтения». –Красноярск. -2025. -С.173.

[113-А]. Жумаев, М.Т. Растворимость системы 3Ca^{2+} - SO_4^{2-} - O_3^{2-} - 2HCO_3^- - H_2O при 75 °С / М.Т. Жумаев, Л.Солиев // Материалы Междун. науч. практ. конф. «Комплексные соединения и аспекты их применения». -Душанбе. -2025. -С. 17-20.

[114-A]. Жумаев М.Т. Анализ кристаллизующих фаз в многокомпонентной системе Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, CO_3^{2-} , HCO_3^- - H_2O при 75 °C / М.Т. Жумаев, Л. Солиев // Материалы Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы современной химии, решения и перспективы развития». 15.05.2025. Денав. -С. 82-84.

[115-A]. Жумаев, М.Т. Мувозинатҳои дивариантӣ дар системаи бисёркомпонентаи Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, CO_3^{2-} , HCO_3^- - H_2O / М.Т. Жумаев, Л. Солиев // Хонишҳои XX Нӯзмонӣ дар мавзӯи: «Марҳилаҳои муосири рушди илмҳои кимиёвӣ ва техники: масъалаҳои мубрами назария ва амалия». -Душанбе. -2025. -С. 70-74.

[116-A]. Жумаев, М.Т. Сохтори диаграммаи системаи CaCO_3 - CaF_2 - $\text{Al}_4\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$ - TiO_2 / М.Т. Жумаев, А.Ш. Муродиён, Л.Солиев // Маводи конференсияи байналхалқии илмӣ-назариявии «Марҳилаҳои ҳозираи инкишофи илмҳои табиатшиносӣ, дақиқ ва риёзӣ дар соҳаи илм ва маориф: масъалаҳои актуалӣ, назария ва амалия». -Душанбе. -2025. -С. 114-117.

[117-A]. Жумаев, М.Т. Уточнение фазовой диаграммы в многокомпонентной системе Na , $\text{Ca} \parallel \text{SO}_4$, CO_3 , HCO_3 - H_2O при 100 °C / М.Т. Жумаев, Л. Солиев // «V-Байкальском материаловедческом форум». -Улан-Уде. -2025. -С. 78-79.

[118-A]. Жумаев, М.Т. Мувозинати нонвариантӣ дар системаи бисёркомпонентаи Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, CO_3^{2-} , HCO_3^- - H_2O / М.Т. Жумаев, Л. Солиев // Маводи конференсияи II-юми байналхалқии илмӣ-амалии «Масъалаҳои мубрами соҳаи металлургия дар шароити саноатикунории босуръати кишвар». –Душанбе. -2025. -С. 130-136.

АННОТАТСИЯ

ба таҳқиқоти диссертациони Жумаев Маъруфжон Тағоймуротович дар мавзӯи
«Полимермаи комплекси фазагӣ ва ҳалшавандагии системаи обӣ-намакии сульфатҳо, карбонатҳо,
гидрокарбонатҳои натрий ва калсий» барои дарёфти дараҷаи илмӣ доктори илмҳои химия аз рӯйи
ихтисосҳои 1.4.2 Химияи ғайриорганикӣ ва 1.4.5 Химияи физикӣ

Калимаҳои калидӣ: полимерма, комплекси фазагӣ, фрагментатсия, ҳосиятҳои топологӣ, ифодаҳои геометрӣ, тарзи ҳосилкунӣ, кристаллизатсия, декагидрати карбонати натрий, нахколит, системаи Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, CO_3^{2-} , HCO_3^- - H_2O .

Объекти таҳқиқоти илмӣ: системаи бисёркомпонентаи Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, CO_3^{2-} , HCO_3^- - H_2O , субсистемаҳои компонентнокиашон чори $\text{Na}^+ \parallel \text{SO}_4^{2-}$, CO_3^{2-} , HCO_3^- - H_2O ; $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, CO_3^{2-} , HCO_3^- - H_2O ; Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, CO_3^{2-} - H_2O ; Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, HCO_3^- - H_2O ; Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{CO}_3^{2-}$, HCO_3^- - H_2O ва системаҳои секомпонентаи: $\text{Na}^+ \parallel \text{SO}_4^{2-}$, CO_3^{2-} - H_2O ; $\text{Na}^+ \parallel \text{SO}_4^{2-}$, HCO_3^- - H_2O ; $\text{Na}^+ \parallel \text{CO}_3^{2-}$, HCO_3^- - H_2O ; $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, CO_3^{2-} - H_2O ; $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, HCO_3^- - H_2O ; $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{CO}_3^{2-}$, HCO_3^- - H_2O ; Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$ - H_2O ; Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{CO}_3^{2-}$ - H_2O ; Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{HCO}_3^-$ - H_2O мебошанд.

Ҳадафи таҳқиқот: мукамалкунии усули пешгуӣи полимермаи комплекси фазагӣ дар системаи бисёркомпонентаи обӣ-намакии иборат аз катионҳои натрий, калсий, анионҳои сульфат, карбонат, гидрокарбонат, сохтани диаграммаҳои комплекси фазагӣ, омӯзиши ҳалшавандагӣ дар нуктаҳои нонварианти ва истифодаи маълумоти бадастомада барои ҳалли масъалаҳои амалии технологӣ мебошад.

Усулҳои таҳқиқот: таҳқиқи полимермаи комплекси фазагӣ ва ҳалшавандагии системаи обӣ-намакии сульфатҳо, карбонатҳо, гидрокарбонатҳои натрий ва калсий ва зерсистемаҳои чор-секомпонентаи онро ташкилдиханда бо истифода аз усулҳои муосири таҳлили физико-химиявӣ, хусусан усули транслятсия, массентрӣ, ҳалшавандагӣ.

Навгони илмӣ таҳқиқот:

- усули пешгуӣи полимермаи комплексҳои фазагӣ дар СБК такмил дода шудааст, ки он ба интиқоли элементҳои сохтори системаҳои иборат аз n компонента ба ҳудуди системаи умумии иборат аз $(n + 1)$ компонента асос ёфтааст;

- усули сохтани диаграммаҳои комплексҳои фазагии СБК чунин такмил дода шудааст, ки дар он ҳамаи комплексҳои фазагии имконпазир дар шаклҳои геометрӣ ва ҷойгиршавии яқояи онҳо инъикоси ҳудро меёбанд;

- бо усули такмилдодашудаи назариявӣ, моделонии графикаи пешгуӣи полимермаи комплекси фазагии системаҳои бисёркомпонента ҳамаи мувозинатҳои фазагии имконпазир дар 25 изотермаи системаҳои чоркомпонента ва 5 изотермаи системаҳои панҷкомпонентаи сульфатҳо, карбонатҳо, гидрокарбонатҳои натрий ва калсий ба таври назариявӣ муайян карда шуда, диаграммаҳои изотермаҳои пурраи комплекси фазагии системаҳои таҳқиқшуда сохта шудаанд;

- хусусиятҳои сохтори диаграммаҳои системаҳои бисёркомпонентаи обӣ-намакӣ муайян карда шудаанд, ки шароити тадбиқи амалии фазаҳосилшавиро дар онҳо тавсиф мекунанд;

- роҳҳои кристаллизатсия дар системаи иборат аз анионҳои сульфатҳо, карбонатҳо, гидрокарбонатҳо ва катионҳои натрийю калсий дар ҳудуди ба маҳлули таркиби технологӣ наздик омӯхта шуда, қонуниятҳои кристаллизатсия ва ҳалшавандагии афзалияти намакҳои натрий-калсий муайян карда шудаанд;

- фрагментатсияи диаграммаҳои сохташуда аз рӯйи ҳудудҳои кристаллизатсияи фазаҳои алоҳида (барои системаҳои чоркомпонента) ва кристаллизатсияи яқояи ду фаза (барои системаи панҷкомпонента) пурра муайян карда шудаанд;

- схемаҳои принсипиалии технологияи тарзҳои ҷудокунии фазаҳои саҳти алоҳида дар асоси диаграммаҳои комплекси фазаӣ ва ҳолатии (ҳалшавандагии) зерсистемаҳои системаи бисёркомпонентаи химиявии таҳқиқшаванда таҳия карда шуда, тарзҳои мушаххаси ҷудокунии фазаҳои алоҳида аз партовҳои моеъи саноатӣ пешниҳод карда шудаанд.

Тавсияҳо оид ба истифодаи амалии натиҷаи таҳқиқот. Натиҷаҳои таҳқиқи полимермаи ҳалшавандагӣ ва комплекси фазагӣ дар системаи бисёркомпонентаи обӣ-намакии муовизаи Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, CO_3^{2-} , HCO_3^- - H_2O ва сохтори диаграммаи он имконият медиҳад, ки майдони кристаллизатсияи алоҳидаи 15 фаза, дар шароити додашуда фрагментатсия карда шуда, ҳосиятҳои топологӣ ифодаҳои геометрии ҳоси қисмҳои таркибии системаро ташкилкунанда муайян гардида, вобаста ба онҳо, зимни коркард дар майдонҳои сатҳи чоркомпонента як фаза ва дар сатҳи панҷкомпонента ду фаза ҷудо карда шавад. Консентратсияи мувозинатӣ дар фазаҳои моеъ зимни кристаллизатсияи алоҳида барои майдон ва кристаллизатсияи яқоя барои хатҳо ва нуктаҳо муқаррар карда шавад.

Дар асоси маълумот дар бораи сохтори изотермаҳои мувозинати фазаӣ ва роҳҳои кристаллизатсия дар таҳқиқоти системаҳои обӣ-намакӣ, инчунин маълумоти тавсифи ҷараёни риёзии раванд, усулҳои зерини оптимизатсияи ҷузъҳои технологияи коркарди маъдани полиминералӣ (партовҳои истеҳсоли) таҳия карда шудаанд: усулҳои ба даст овардани декагидрати карбонати натрий, нахколит ва вилонит аз партовҳои моеъи истеҳсоли алюминий истифода бурдан мумкин аст.

АННОТАЦИЯ

к диссертации Жумаева Маъруфжона Тагоймуротовича на тему
«Политерма фазового комплекса и растворимость водно-солевой системы из сульфатов, карбонатов, гидрокарбонатов натрия и кальция» на соискание ученой степени доктора химических наук по специальностям 1.4.2. Неорганическая химия и 1.4.5. Физическая химия

Ключевые слова: политерма, фазовый комплекс, фрагментация, топологический свойство, геометрические образы, способ получения, кристаллизация, декагидрата карбоната натрия, нахколит, система Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, CO_3^{2-} , HCO_3^- - H_2O .

Объект научного исследования: Объектами исследования являются многокомпонентная система Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, CO_3^{2-} , HCO_3^- - H_2O и её структурные четырёхкомпонентные подсистемы: $\text{Na}^+ \parallel \text{SO}_4^{2-}$, CO_3^{2-} , HCO_3^- - H_2O ; $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, CO_3^{2-} , HCO_3^- - H_2O ; Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, CO_3^{2-} - H_2O ; Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, HCO_3^- - H_2O ; Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{CO}_3^{2-}$, HCO_3^- - H_2O , а также трёхкомпонентные подсистемы: $\text{Na}^+ \parallel \text{SO}_4^{2-}$, CO_3^{2-} - H_2O ; $\text{Na}^+ \parallel \text{SO}_4^{2-}$, HCO_3^- - H_2O ; $\text{Na}^+ \parallel \text{CO}_3^{2-}$, HCO_3^- - H_2O ; $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, CO_3^{2-} - H_2O ; $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, HCO_3^- - H_2O ; $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{CO}_3^{2-}$, HCO_3^- - H_2O ; Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$ - H_2O ; Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{CO}_3^{2-}$ - H_2O ; Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{HCO}_3^-$ - H_2O .

Методы исследования: является политерма фазового комплекса и растворимость в водно-солевой системе, образованной сульфатами, карбонатами и гидрокарбонатами натрия и кальция и четырёх-трёхкомпонентных системах с использованием современной методы физико-химического анализа, так же методы трансляции, масцентрический и растворимости.

Научная новизна выполненной работы заключается в следующем:

- разработан и верифицирован усовершенствованный метод прогнозирования политермы фазовых комплексов в многокомпонентных системах (МКС), который базируется на трансляции структурных элементов из системы, содержащей n компонентов, в область общей системы с $(n + 1)$ компонентами;
- модернизировано построение диаграмм, усовершенствован подход к построению диаграмм фазовых комплексов МКС, который обеспечивает комплексное геометрическое отражение всех потенциально возможных фазовых комплексов и их взаимного расположения;
- осуществлено теоретическое и графическое моделирование фазовых равновесий с использованием разработанного и усовершенствованного метода прогнозирования политермы фазовых комплексов в многокомпонентных системах (МКС), теоретически идентифицированы все возможные фазовые равновесия в 20 изотермах четырёхкомпонентных систем и 5 изотермах пятикомпонентных систем сульфатов, карбонатов и гидрокарбонатов натрия и кальция. На основе этих данных построены полные изотермические диаграммы фазовых комплексов исследованных систем;
- выявлены структурные особенности диаграмм, установлены специфические структурные особенности диаграмм исследуемых многокомпонентных водно-солевых систем, которые детерминируют условия практической реализации процессов фазообразования в них;
- изучены траектории кристаллизации в системе с анионами сульфатов, карбонатов, гидрокарбонатов и катионами натрия, кальция в области составов, сопоставимых с технологическими растворами. Выявлены закономерности кристаллизации и определена преимущественная растворимость натриево-кальциевых солей;
- осуществлена полная фрагментация построенных диаграмм по границам кристаллизации индивидуальных фаз для четырёхкомпонентных систем, а также совместная кристаллизации двух фаз для пятикомпонентной системы;
- осуществлена технологическая имплементация, на основе анализа диаграмм фазового комплекса и диаграмм состояния (растворимости) подсистем, разработаны принципиальные технологические схемы для селективного выделения индивидуальных твёрдых фаз. Предложены конкретные методы разделения отдельных фаз из состава жидких промышленных отходов.

Степень использования: Результаты исследования политермы растворимости и фазового комплекса водно-солевой взаимной системы Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, CO_3^{2-} , HCO_3^- - H_2O и структуры ее диаграммы позволяют: фрагментировать область кристаллизации 15 отдельных фаз в заданных условиях; определить топологические свойства геометрических выражений, характерных для составляющих подсистем; на основании этих свойств выделять одну фазу при обработке в полях четырехкомпонентного уровня и две фазы - на пятикомпонентном уровне; установить равновесные концентрации в жидкой фазе при отдельной кристаллизации (для полей) и при совместной кристаллизации (для линий и точек).

На основании данных о структуре изотерм фазового равновесия и путях кристаллизации в водно-солевых системах, а также информации о математическом описании процесса, могут быть применены следующие методы оптимизации технологических узлов переработки полиминерального сырья (производственных отходов): методы получения декагидрата карбоната натрия, нахколита и виломита из жидких отходов алюминиевого производства.

ABSTRACT

of the doctoral dissertation by Jumaev Marufjon Tagoymurotovich on the topic: «Polytherm of the phase complex and solubility of the aqueous salt system of sodium and calcium sulfates, carbonates, and bicarbonates» submitted for the degree of Doctor of Chemical Sciences in the specialties:
1.4.2. Inorganic Chemistry and 1.4.5. Physical Chemistry

Keywords: polytherm, phase complex, fragmentation, topological property, geometric shapes, production method, crystallization, sodium carbonate decahydrate, nahcolite, Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, CO_3^{2-} , HCO_3^- - H_2O system.

Object of research: The objects of the study are the multicomponent system Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, CO_3^{2-} , HCO_3^- - H_2O and its structural four-component subsystems:

$\text{Na}^+ \parallel \text{SO}_4^{2-}$, CO_3^{2-} , HCO_3^- - H_2O ; $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, CO_3^{2-} , HCO_3^- - H_2O ; Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, CO_3^{2-} - H_2O ; Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, HCO_3^- - H_2O ; Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{CO}_3^{2-}$, HCO_3^- - H_2O as well as the three-component subsystems: $\text{Na}^+ \parallel \text{SO}_4^{2-}$, CO_3^{2-} - H_2O ; $\text{Na}^+ \parallel \text{SO}_4^{2-}$, HCO_3^- - H_2O ; $\text{Na}^+ \parallel \text{CO}_3^{2-}$, HCO_3^- - H_2O ; $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, CO_3^{2-} - H_2O ; $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, HCO_3^- - H_2O ; $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{CO}_3^{2-}$, HCO_3^- - H_2O ; Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$ - H_2O ; Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{CO}_3^{2-}$ - H_2O ; Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{HCO}_3^-$ - H_2O .

Research methods: The study employs the polytherm of the phase complex and solubility analysis in the aqueous salt system formed by sodium and calcium sulfates, carbonates, and bicarbonates, as well as in four- and three-component systems. The research utilizes modern methods of physicochemical analysis, including the translation method, the mass-centric method, and the solubility method.

Scientific Novelty of the Work: The scientific novelty of the research is as follows:

- Developed and verified an improved method for predicting the polytherm of phase complexes in multicomponent systems (MCS), based on the translation of structural elements from an n-component system into the region of a general system with (n+1) components.

- Modernized diagram construction, improving the approach to modeling phase complex diagrams of MCS, which provides a comprehensive geometric representation of all potentially possible phase complexes and their relative positioning.

- Conducted theoretical and graphical modeling of phase equilibria using the developed and improved method for predicting the polytherm of phase complexes in MCS. All possible phase equilibria were theoretically identified in 20 isotherms of four-component systems and 5 isotherms of five-component systems containing sodium and calcium sulfates, carbonates, and bicarbonates. Based on these data, complete isothermal diagrams of the phase complexes of the studied systems were constructed.

- Identified structural features of the diagrams, establishing specific structural characteristics of the investigated multicomponent aqueous salt systems that determine the conditions for the practical implementation of phase formation processes within them.

- Studied crystallization trajectories in the system containing sulfate, carbonate, and bicarbonate anions and sodium and calcium cations in composition ranges comparable to technological solutions. Crystallization patterns were identified, and the preferential solubility of sodium-calcium salts was determined.

- Performed complete fragmentation of the constructed diagrams along the crystallization boundaries of individual phases for four-component systems, as well as the joint crystallization of two phases for the five-component system.

- Achieved technological implementation; based on the analysis of phase complex diagrams and state (solubility) diagrams of the subsystems, fundamental technological schemes were developed for the selective isolation of individual solid phases. Specific methods were proposed for the separation of individual phases from the composition of liquid industrial wastes.

Degree of Application: The results of the study on the solubility polytherm and phase complex of the aqueous salt reciprocal system Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, CO_3^{2-} , HCO_3^- - H_2O , along with its diagram structure, allow for the following: Fragmentation of the crystallization regions of 15 individual phases under specified conditions; Determination of the topological properties of geometric expressions characteristic of the constituent subsystems; Isolation of a single phase during processing within four-component level fields, and two phases at the five-component level, based on these properties; Establishment of equilibrium concentrations in the liquid phase during individual crystallization (for fields) and joint crystallization (for lines and points).

Based on the data regarding the structure of phase equilibrium isotherms and crystallization paths in aqueous salt systems, as well as information on the mathematical description of the process, the following optimization methods for technological units in the processing of polymineral raw materials (industrial waste) can be applied: Methods for obtaining sodium carbonate decahydrate, nahcolite, and villiaumite from liquid waste produced in aluminum manufacturing.