

**ДОНИШГОХИ ДАВЛАТИИ ОМӮЗГОРИИ ТОЧИКИСТОН
БА НОМИ САДРИДДИН АЙНӢ**

Бо ҳуқуқи дастнавис

ТДУ: 546.123.7+541.015.32.6

ТКБ: 24.1+24.5

Ж - 88



ЖУМАЕВ МА҆РУФЖОН ТАҒОЙМУРОТОВИЧ

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

АВТОРЕФЕРАТИ

диссертатсия барои дарёфти дараҷаи илмии

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 гайриорганикии Донишгоҳи давлатии омӯзгории Тоҷикистон ба номи Садриддин Айнӣ иҷро карда шудааст.

Мушовирони илмӣ:

Солиев Лутфулло, Арбоби илм ва техникаи

Тоҷикистон, доктори илмҳои химия, профессор, профессори кафедраи химияи умумӣ ва гайриорганикии Донишгоҳи давлатии омӯзгории Тоҷикистон ба номи Садриддин Айнӣ;

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

Муқарризони расмӣ:

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

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

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

Муассисай пешбар:

Донишгоҳи (Славянни) Россия ва Тоҷикистон

Химояи диссертатсия «__» ____ соли 2026, соати 13:00 дар маҷлиси шурои диссертационии 6D.KOA-010 назди Донишгоҳи миллии Тоҷикистон баргузор мегардад.

Суроға: 734025, ш.Душанбе, хиёбони Рӯдакӣ, 17 Донишгоҳи миллии Тоҷикистон, бинои асосӣ, толори шурои диссертационӣ, ошёнаи дуюм, E.mail: 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 илмии
шурои диссертационӣ, н.и.ҳ., дотсент



Бекназарова Н.С.

Муқаддима

Мубрамии мавзуи таҳқиқот. Даствардхой асосҳои таҳлили физико-химиявӣ дар соҳаҳои химияи гайриорганикӣ ва химияи физикиӣ, ҳусусан омӯзиши системаҳои металлӣ, оксидӣ ва намакӣ дар маҷмӯъ хуб эътироф шудаанд. Бо вучуди ин, аксари корҳо ба системаҳое тааллук доранд, ки на бештар аз ҷор компонентро дар бар мегиранд. Ин бисёртар ба мушкилоти ифодаҳои геометрии усулҳои тасвир, соҳтани диаграммаҳои комплексҳои фазагӣ (ДКФ) ва муайян кардани фазаҳои саҳти мувозинатӣ дар системаҳои бисёркомпонента (СБК) алоқаманд мебошад.

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

Яке аз объектҳои таҳқиқотии асосии саноатӣ дар ҳудуди Ҷумҳурии Тоҷикистон заводи «Алюминийи Тоҷик» аст. Партовҳои он майдонҳои фоиданокро бекор ва муҳити зистро вайрон мекунанд. Ҳол он ки дар таркиби партовҳои мазкур мавҷудияти моддаҳои зарурӣ, ба монанди: фторидҳо, сулфатҳо, карбонатҳо, гидрокарбонатҳои натрий, калий, калсий ва алюминий мушоҳида шуда, донистани қонуниятҳои комплекси фазагӣ имконияти коркарди дубораи онҳоро ба вучуд оварда метавонад.

Бинобар ин, муайянкунии политетрмаи комплекси фазагӣ дар системаи бисёркомпонентаи $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}, \text{CO}_3^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$ дар фосилаи ҳароратҳои $0\div100^\circ\text{C}$ илочи шароитҳои оптималии аз нав коркарди партовҳои моеъи саноатиро, ки таркибан сулфатҳо, карбонатҳо, гидрокарбонатҳои натрий ва калсий доранд, ба амал меорад.

Дараҷаи коркарди илмии проблемаи мавриди омӯзиш. Асосҳои таҳлили физико-химиявӣ (АТФХ), ҳусусан таҳлил ва таҳқиқи системаҳои химиявӣ аз ҷониби як қатор олимон ба роҳ монда шудааст, ки аз ҷумлаи онҳо: Н.С. Курнаков; В.Н. Лодочников; В.П. Радиев; 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. Фаниев ва дигарон мебошанд.

Олимони номбурда таҳқиқотҳои илмиашонро асосан дар системаҳои химиявии металлӣ, оксидӣ, намакӣ вобаста ба ҳарорати гудозиш 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. Гулович, 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 $\text{Na, K, Mg, Ca} \parallel \text{SO}_4, \text{Cl-H}_2\text{O}$ «системаи баҳрӣ» барои фосилаи ҳароратҳои $0\div100^\circ\text{C}$ дар сатҳи панҷкомпонентагӣ ва ҳудуди майдонҳои кристаллизатсияҳои алоҳидай он дар сатҳи шашкомпонентагӣ иҷро намуда, диаграммаҳои фазагии системаи мазкур ва ҳалшавандагии зерсистемаҳои онро ташкилкунандаро соҳта, фрагментатсия (сигментатсия)-и фазаҳои алоҳидаро ба анҷом расонидаанд. Аммо, дар зимни таҳлили адабиёт маълум гардид, ки политетрмаи системаи панҷкомпонентаи $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}, \text{CO}_3^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$ аз ҷониби муҳаққиқон умуман омӯхта нашуда, диаграммаи комплекси фазагӣ, ҳолатӣ ва политетмиашон соҳта нашудаанд. Ҳалшавандагии баъзе субсистемаҳои СБК-ро ташкилдиханд қисман омӯхта шуда бошанд ҳам, вале диаграммаи ҳалшавандагиашон соҳта нашудааст.

Робитаи таҳқиқот бо барномаҳо (лоиҳаҳо), мавзухои илмӣ. Таҳқиқоти диссертационии мазкур имконияти ҳалли вазифаҳои ҳадафиҷи стратегии миллиро оиди рушди саноати химиявӣ, пажуҳиш ва коркарди ашёи хоми маҳаллӣ ва партовҳои саноатӣ зоҳир менамояд. Дар доираи иҷрои барномаи болозикр иҷрои диссертатсия вобаста ба мавзухои илмӣ-таҳқиқотии фармоишӣ зерин гузаронида

шуданд: «Муайянсози 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-} , $\text{F}^- - \text{H}_2\text{O}$ барои 273 ва 298 К».

ТАВСИФИ УМУМИИ ТАҲҚИҚОТ

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

Вазифаи таҳқиқот:

- такмили усулҳои муайянкунии политетмии комплекси фазагӣ дар эксперименталӣ омузиши системаҳои бисёркомпонентаи обӣ-намакӣ;
- такмили усулҳои сохтани диаграммаҳои политетмии комплекси фазагӣ ва ҳалшавандагии СБК;
- таҳқиқи мушаххаси комплексҳои фазагӣ дар системаҳои бисёркомпонентаи обӣ-намакии сулфатҳо, карбонатҳо, гидрокарбонатҳои натрий ва калсий;
- истифодай 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 металли ишқории натрийю металли ишқорзаминии калсий бо анионҳои мувофиқи номбурда) ва зерсистемаҳои бавуҷудорандай системаи панҷкомпонента;
- ҳудуди майдонҳои алоҳида фрагментатсияи диаграммаҳои сохташуда вобаста ба кристаллизатсияи фазаҳои холиси дивариантии системаҳои чоркомпонента ва кристаллизатсияи хатҳои моновариантӣ якҷояи ду фазаи системаи панҷкомпонента;
- таҳияи схемаҳои принсиалии технологии тарзҳои ҷудокуни фазаҳои саҳти алоҳида дар асоси диаграммаҳои комплекси фазавӣ ва ҳолатии (ҳалшавандагии) зерсистемаҳои системаи бисёркомпонентаи химиявии таҳқиқшаванда.

Объекти таҳқиқот. Системаи бисёркомпонентаи Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, CO_3^{2-} , $\text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$, субсистемаҳои компонентнокиашон чори $\text{Na}^+ \parallel \text{SO}_4^{2-}$, CO_3^{2-} , $\text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$; $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, CO_3^{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 системаҳои секомпонентаи: $\text{Na}^+ \parallel \text{SO}_4^{2-}$, $\text{CO}_3^{2-} - \text{H}_2\text{O}$; $\text{Na}^+ \parallel \text{SO}_4^{2-}$, $\text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$; $\text{Na}^+ \parallel \text{CO}_3^{2-}$, $\text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$; $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, $\text{CO}_3^{2-} - \text{H}_2\text{O}$; $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, $\text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$; $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{CO}_3^{2-}$, $\text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$; $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-} - \text{H}_2\text{O}$; $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+} \parallel \text{CO}_3^{2-} - \text{H}_2\text{O}$; $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+} \parallel \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$ мебошанд.

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

Навғонии илмии таҳқиқот:

- усули пешгӯии политетмии 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 якҷояи онҳо инъикоси худро мейбанд;

- бо усули такмилдодашуудаи назарияйӣ, моделонии графикии пешгӯии политермаи комплекси фазагии системаҳои бисёркомпонента ҳамаи мувозинатҳои фазагии имконпазир дар 25 изотермаи системаҳои чоркомпонента ва 5 изотермаи системаҳои панҷкомпонентай сулфатҳо, карбонатҳо, гидрокарбонатҳои натрий ва калсий ба таври назарияйӣ муайян карда шуда, диаграммаҳои изотермаҳои пурраи комплекси фазагии системаҳои таҳқиқшуда сохта шудаанд;

- хусусиятҳои сохтори диаграммаҳои системаҳои бисёркомпонентай обӣ-намакӣ муайян карда шудаанд, ки шароити тадбиқи 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 рӯйи ҳудудҳои кристаллизатсияи фазаҳои алоҳида (барои системаҳои чоркомпонента) ва кристаллизатсияи якҷояи ду фаза (барои системаи панҷкомпонента) пурра муайян карда шудаанд;

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

Нуқтаҳои ба ҳимоя пешниҳодшаванд:

- таҳқиқи усули такмилдодашуудаи 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 мёбанд;

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

- муайянкунии хусусиятҳои сохтори диаграммаҳои системаҳои бисёркомпонентай обӣ-намакие, ки шароити тадбиқи 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 рӯйи ҳудудҳои кристаллизатсияи майдонҳои дивариантӣи фазаҳои алоҳида дар сатҳи чоркомпонентай таркиб ва кристаллизатсияи якҷояи ҳатҳои моновариантӣи ду фаза дар сатҳи таркиби панҷкомпонентай системаи омӯхташаванд;

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

Аҳамияти назарияйӣ ва илмию амалии таҳқиқот:

- усули коркардшуда 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 вариантнокиаш пешгӯй карда шаванд (дар асоси қоидай фазаҳои Гиббс);

- қонунияти муқарраршудаи кристаллизатсия ва ҳалшавии намакҳои натрий-калсий имкон медиҳад, ки ин равандҳо ҳангоми ҳалли масъалаҳои ба даст овардани фазаҳои саҳти алоҳидаи мақсаднок аз системаҳои бисёркомпонентаи обӣ-намакӣ идора карда шаванд;

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

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

Дараҷаи эътиимоднокии натиҷаҳо. Эътиимоднок будани натиҷаҳои илмии ба даст омадаро усулҳои ҳозиразамони таҳлили физико-химиявӣ, апрабатсияи онҳо дар форум, симпозиум, конференсияҳои сатҳҳои Байналхалқию Ҷумҳуриявӣ ва нашри мавод дар маҷаллаҳои илмии таҳассусӣ тавсиянамудаи КОА ҔТ ва дигар журналҳои илмии профиљӣ тасдиқ ва асоснок менамоянд.

Мутобиқати диссертатсия ба шинонномаи ихтисоси илмӣ. Соҳаи таҳқиқ ба шинонномаҳои ихтисосҳои илмии химияи гайриорганикӣ ва химияи физикӣ аз рӯйи бандҳои зерин мувофиқат мекунанд.

1.4.2. Химияи гайриорганикӣ. Банди 1. Муайянкунии ҳарактери боҳамалоқамандии байни таркиб, соҳт ва ҳосияти пайвастҳои гайриорганикӣ (боби II). Банди 2. Коркарди усулҳои омӯзиши пайвастҳои гайриорганикӣ (боби III). Банди 3. Тарзи ҳосилкунӣ ва омӯзиши структура ва ҳосияти мавод дар асоси пайвастагиҳои гайриорганикӣ (боби V). Банди 4. Омӯзиши табдилоти химиявӣ ва структуравӣ-фазавии пайвастҳои гайриорганикӣ дар зери таъсиrotи муҳталиф (боби IV).

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

Саҳми шахсии довталаби дараҷаи илмӣ дар таҳқиқот ин тартиб додани ҳадафҳои таҳқиқот, ҷамъоварӣ, коркард, таҳлил ва интишороти илмӣ, муайянкунии усулҳое, ки тавассути онҳо масъалаҳои гузошташуда роҳи ҳалли ҳудро мейбанд, васли таҷҳизотҳои таҷрибавӣ, гузаронидани таҷрибаҳо дар ҳамаи марҳилаҳои омӯзиш, коркарди хулоса, маълумоти таҷрибавӣ ва ҳисобҳои он мебошанд.

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

конференсия илмй-амалии «Научные исследования и разработки в эпоху глобализации» (Киров, 2016); II конференсия умумироссиягии олимони чавон бо иштироки Байналхалқи «Достижения химии в агропромышленном комплексе» (Уфа, 2016); XI хониши Курнаковии таҳлили физико-химиявй ҳамчун XX съезди Менделеевй аз химии умумй ва тадбиқй (Воронеж, 2016); конференсия Байналхалқи «Термический анализ и калориметрия» (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); конференсия илмй Байналхалқи «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); конференсия Байналхалқи илмй-амалии «Фундаментальные и прикладные исследования в науке и образовании» (Стерлитамак, 2020); конференсия илмй-амалии Ҷумхуриявии «Современное состояние и перспективы физико-химического анализа» (Душанбе, 2021); Симпозиуми умумироссиягии олимони чавон бо иштироки Байналхалқи «Физико-химические методы в междисциплинарных экологических исследованиях» (Москва, 2021); конференсия Байналхалқи «Современные проблемы металлургической промышленности» (Душанбе, 2021); «IV-Байкальском материаловедческом форуме» (Улан Уде, 2022); конференсия илмй-амалии Ҷумхуриявии «Современное состояние и перспективы физико-химического анализа» (Душанбе, 2023); симпозиуми умумироссиягй ва олимони чавони «Физико-химические методы в междисциплинарных исследованиях» (Севастополь, 2023); конференсия илмй-амалии Байналхалқи «Развитие новых направлений в химии и химической технологии» (Душанбе, 2023); конференсия Байналхалқи «Химическая наука и образование, проблемы и перспективы развития» (Махачкала, 2024); конференсия илмй-амалии «Нақши химия ва саноати химиявй дар саноатикунини Тоҷикистон» (Душанбе, 2024); IV конференсия Байналхалқи «Вопросы физической и координационной химии» (Душанбе, 2024); «XXII Менделеевский съезд по общей и прикладной химии» (Сириус, 2024); XIX хонишҳои Нуъмоновӣ (Душанбе, 2024); конференсия илмй-амалии Ҷумхуриявии «Современное состояние и перспективы физико-химического анализа» (Душанбе, 2025); «IX Булатовские чтения» (Красноярск, 2025); конференсия Байналхалқи «Комплексные соединения и аспекты их применения» (Душанбе, 2025); конференсия Байналхалқи илмй-амалии «Актуальные проблемы современной химии, решения и перспективы развития» (Денов, 2025); «V-Байкальском материаловедческом форуме» (Улан-Уде, 2025); конференсия Байналхалқи «Пайвастҳои комплексӣ ва ҷанбаҳои истифодабарии онҳо» (Душанбе, 2025) ва XX хонишҳои Нуъмоновӣ (Душанбе, 2025) муҳокима гардида, аз арабатсия гузаштаанд.

Интишорот аз рӯйи мавзуи диссертатсия. Дар асоси кори диссертационӣ 118 маводди илмй нашр шудааст, аз ин төъдод: 3 монография, 3 нахустпатент, 73 мақола дар маҷаллаҳои тавсиянамудаи тақризшаванди Комиссияи олии аттестационии назди Президенти Ҷумхурии Тоҷикистон, Федератсияи Россия ва дигар маҷаллаҳои пойгоҳи байналхалқи, 39 фишурдаи мақолаҳо дар маводди форум, симпозиум ва конференсияҳои байналхалқи ва ҷумхуриявй.

Сохтор ва ҳаҷми диссертатсия. Диссертатсия аз муқаддима, 5 боб, 364 саҳифаи чопи компьютерӣ, 123 расм, 91 ҷадвал, хулосаҳои умумй, тавсия ва замимаҳо иборат аст.

МУНДАРИҔАИ АСОСИИ ТАҲҚИҚОТ

Дар муқаддима мубрамият ва зарурат бо аҳамияти мавзуи таҳқиқоти диссертационӣ дарҷ гардида, ҳадаф ва вазифаҳои он муайян гардида, аҳамияти илмий-назариявй ва амалий инъикоси худро ёфтааст.

Боби якуми таҳқиқоти диссертационӣ ба шарҳи муҳтасари адабиёт оид ба асосҳои назариявии усулҳои таҳқиқи системаҳои бисёркомпоненти мувозизи намакӣ, аз ҷумла: усули матритсавӣ тасвир намудани системаҳои бисёркомпоненти намакӣ;

усулҳои триангулятсияи диаграммаҳои системаҳои бисёркомпонентаи муовиза; усули конверсионии таҳқиқи системаҳои бисёркомпонента; муайянкуни комплексҳои фазагии системаҳои химиявӣ бо усули транслятсия; омӯзиши политермаи комплекси фазагии системаҳои химиявӣ ва ҳолати омӯзиши политермии 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 соҳта ўздааст.

Дар **боби сеюм** натиҷаҳои омӯзиши политермаи соҳтори 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 соҳта 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 $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}, \text{CO}_3^{2-}, \text{HCO}_3^-$ - H_2O асоси коркарди партовҳои моёни истехсоли алюминий, мувозинати дивариантӣ, мувозинати моновариантӣ ва мувозинати нонвариантӣ дар системаи бисёркомпонентаи таҳқиқшаванда оварда шуда, диаграммаи ҳолатии системаи бисёркомпонентаи объекти асосии таҳқиқот соҳта шудааст. Дар асоси диаграммаи соҳташуда тарзҳои чудокуни фазаҳои саҳти майдонҳои дивариантӣ оварда шудааст.

Диссертатсия бо хулосаҳои умумӣ, тавсияҳои пешниҳодшуда оид ба тадбиқи амалии маълумотҳои аз ҷониби муаллиф пешниҳодшуда, инчунин, рӯйхати адабиёти истифодагардиде 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 $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{CaCO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$; Cs - 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 политопҳои система; МФ - мувозинатҳои фазагӣ; КФ - комплекси фазагӣ; АТФХ - асосҳои таҳлили физико-химиявӣ.

Муайянсозии политермаи комплекси фазагии системаҳои химиявӣ ва ҳолати омӯзиши политермии системаи панҷкомпонентаи $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}, \text{CO}_3^{2-}, \text{HCO}_3^-$ - H_2O

Тасвири диаграммаҳои системаҳои муовизаи обӣ-намакӣ бо якчанд усули амалий 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 Иенеке бо истифодабарии квадрати таркиби намакӣ асоснок кунонида шудааст, ки перпендикуляр ба он миқдори молҳои об дар 100 мол массаи намак ишора мешаванд.

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

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

Дар тасвири графики системаҳои бисёркомпонента корҳои Радишев мавқеи маҳсусро ишғол мекунанд. Олимӣ болозикр барои тасвири графикии 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 графикии системаи панҷкомпонентаи $\text{Na}, \text{K}, \text{Mg} // \text{SO}_4, \text{Cl} - \text{H}_2\text{O}$, ки ҳамчун «системаи баҳрӣ» маълум аст ва нисбат ба хлориди натрий (NaCl) сершуда аст, усули шаклдодашудаи Левенгерсро истифода бурдааст. Дар ин варианти такмилдодашуда концентратсияи хлориди натрий дар диаграмма нишон дода намешавад. Ҳамзамон, мутобиқ ба реаксияҳои муовизаи дар система ҷой дошта, адади молҳои сулфати натрий ҳамчун тири баробарқимати ду вектора (сулфат ва хлориди магний) истифода бурда мешавад.

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

Харви бо ҳамкоронаш дар асоси бузургии потенсиалии термодинамикӣ ассотсиатҳои фазагиро барои нуқтаҳои нонвариантӣ системаи шашкомпонентаи $\text{Na}, \text{K}, \text{Mg}, \text{Ca} // \text{SO}_4, \text{Cl} - \text{H}_2\text{O}$ барои ҳарорати 25°C ҳисоб кардааст. Дар ин ҳолат устувории комбинатсияҳои ҳосилшудаи фазаҳои саҳт 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 худи муаллифон қайд мекунанд натиҷаҳои боэътиҳодро танҳо барои системаҳои то ҷоркомпонента ба даст овардан мумкин. Бояд қайд кард, ки диаграммаҳои ҳолатии системаҳои бисёркомпонента бо қадом усуле, ки сохта нашавад, бо сабаби бисёр будани элементҳои геометриашон (нуқтаҳои нонвариантӣ, ҳатҳои моновариантӣ, майдонҳои дивариантӣ) барои ҳисобҳои графикӣ номувофиқ мебошанд.

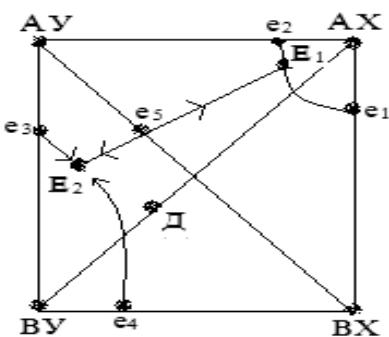
Олимон бо усули триангүлятсияи диаграммаҳои таркибӣ политопҳои барҷастаи диаграммаҳои таркибии системаи $(n+1)$ - компонентаи муайян намуда бошанд ҳам, вале ин усул имкони мушахҳас соҳтани диаграммаҳоро намедиҳад. Усули мазкур бо истифода аз алгоритм моделҳои диаграммаҳои системаҳои химиявиро пешниҳод мекунаду ҳалос. Он мушахҳас диаграммае, ки фарогири ҳамаи ҳосиятҳои физико-химиявӣ бошад, пешниҳод каарда наметавонад. Чуноне, ки қайд намудем усулҳои ананавии соҳтани диаграммаҳои мувозинатҳои фазагӣ дар асоси ҳосиятҳои ҷеншавандаашон 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 З ва зиёда компонентҳо ташкил ёфтаанд, тадбиқшаванда мебошад.

Диаграммаҳои фазагӣ ва сатҳи системаҳое, ки дар онҳо танҳо намакҳои онҳоро ташкилдиҳанда кристаллизатсия мешаванд. Соҳтани диаграммаҳои ҳолатии системаҳои секомпонентаи муовиза аз диаграммаҳои ҳолатиашон фарқ надоранд. Чунки дар ҳарду ҳолат дар тирҳои амудии шакли геометрии квадратӣ бузургии ба ҳарорат тааллукдор ҷойгир гардида, аз онҳо дар асоси нуқтаҳои ҳосилшуда ҳатҳои ҳамвори майдонҳоро ҷудокунанда гузаронида мешаванд.

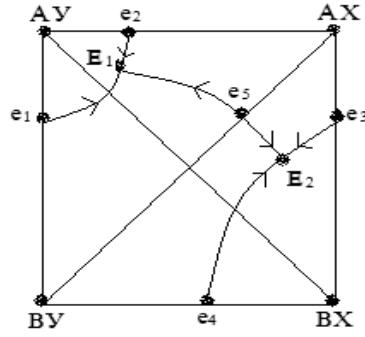
Бо ҳамин усул соҳтани сатҳи диаграммаҳо дар якҷоягӣ бо ҳаҷмҳои байни онҳо диаграммаҳои фазагии системаи омӯҳташавандай химиявиро ташкил медиҳанд, ки аз рӯйи соҳтори худ ба диаграммаҳои соҳтории системаҳои секомпонентаи муқаррарӣ монанд мебошанд: аз боло онҳо бо сатҳи ликвидус ва аз поён бо солидус маҳдуд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

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

Диаграммаҳои сатҳии бо ин усул ҳосилшуда як қатор ҳосиятҳои геометрии диаграммаҳои системаҳои секомпонентай муқаррариро доро мебошанд: дар он қоидаҳои фашанг, маркази вазн, хатти рости пайвастикунандай Ван Рейн Алкемаде амал мекунанд. Дар чунин диаграммаҳо метавонанд нуқтаҳои нонвариантӣи эвтоникий ва эвтектикий ҷой дошта бошанд. Ҳатҳои сарҳадӣ метавонанд конгруэнтий ва инконгруэнтий бошанд. Роҳҳои кристаллизатсия монанди системаҳои секомпонентай муқаррарӣ муайян карда мешаванд.



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



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

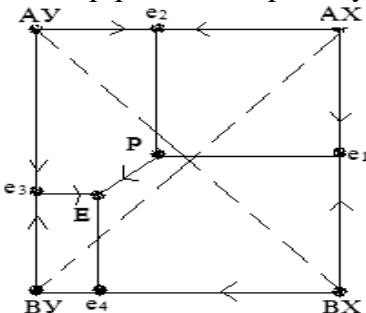
Дар расми 1 яке аз чунин диаграммаҳо нишон дода шудааст, ки дар он диагонали АҮ-ВХ диаграммаро ба ду системаи муқаррарии секомпонента: ВХ-АҮ-АХ ва ВХ-АҮ-ВУ тақсим намудааст. Дар ҳар қадом диаграммаҳои ин системаҳои секомпонента ҳаммаи элементҳои геометрии даҳлдор мавҷуд мебошанд: эвтектикаи сечандай Е₁ бо сехатҳои сарҳадии Е₁e₁, Е₁e₂ ва Е₁e₅ барои системаи секомпонентай ВХ-АҮ-АХ; эвтоникаи сечандай Е₂ бо сехатҳои сарҳадии Е₂e₃, Е₂e₄ ва Е₂e₅ - барои системаи секомпонентай ВХ-АҮ-ВУ. Дар системаи секомпонентай аввала майдонҳои АҮe₂E₁e₅ (барои компоненти АҮ); АХe₂E₁e₁ (барои компоненти АХ) ва ВХe₁E₁e₅ (барои компоненти ВХ). Дар системаи секомпонентай дуюм майдонҳои ВҮe₃E₂e₄ (барои компоненти ВҮ); ВХe₄E₂e₅ (барои компоненти ВХ) ва АҮe₃E₂e₅ (барои компоненти АҮ) мавҷуданд. Майдонҳои компоненти АҮ 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 АҮ-ВХ квадратӣ ном дорад. Дар системаҳои муовиза чунин диагоналҳо нуқтаҳоеро пайваст мекунанд, ки дар онҳо пайвастҳо аз гудохтаҳои омехтаҳои худ дар ҳолати холис, ё дар шакли пайвасти ҳар ҷорашро дошта таҳшин мешаванд, яъне бе реаксияи муовиза. Ҳатҳои диагоналии стабилий ҳатти сарҳадии ду эвтоникаро пайвасткунандаро бурида нуқтаи зинагиро (e₃) ҳосил мекунад, ки вай нуқтаи эвтектикийи ин буриш ва максималии ҳатти қачи сарҳадӣ мебошад.

Ҳамин тавр диагоналии стабилий гуфта ҳатти буриши қвазибинариро меноманд. Дар эвтоникаҳои сечандай системаи дар расми 1 овардашуда омехтаи намакҳои АҮ-ВХ-АХ (эвтектикаи Е₁) ва ВҮ+АҮ+ВХ (эвтектикаи Е₂) кристаллизатсия мешаванд. Ҷуфти намакҳое, ки дар таркиби маҳсулоти охирини саҳтшавии гудохтаи эвтектикий ҳастанд ҷуфти стабилий ном доранд. Буриши дигар диагонал (АХ-ВҮ) системаи дучандаро намедиҳад. Масалан, агар мо омехтаи ин ду намакро (нуқтаи Д) гудохта ин гудохтаро хунук намоем, онгоҳ дар кристаллизатсияи аввала на намаки АХ ва на намаки АҮ-ро ҳосил накарда, балки намаки ВХ-ро ҳосил мекунем, ки вай маҳсулоти реаксияи боҳамтасиркунии АХ ва ВҮ мебошад. Дар зинаи дуюми кристаллизатсия намакҳои ВХ+ВҮ ва дар зинаи сеюми кристаллизатсия маҷмӯи намакҳои ВХ, ВҮ ва АҮ-ро, ки диаганалии стабилиро ташкил медиҳанд, ба даст меорем.

Дар расми 2 диаграммаи системаи секомпонентаи муовизаи А, В // X, Y бо диагонали стабилии AX-BY 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 соҳтори 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 AX+AY+BX бо маҳлули сер мувофиқ омада, аммо аз эвтоникии Е₁ расми 1 бо он фарқ мекунад, ки ба ҷои кристаллизатсия якҷояи се фазаи саҳти дар мувозинатбуда раванди инконгруэнтӣ ҷой дорад: намаки AX ҳал шуда, намакҳои AY ва BX чудо мешаванд. Агар дар омехтаи гирифташуда миқдори зарурӣи компоненти BY барои пурра табдилёбии намакҳои AX ва AY набошад, онгоҳ кристаллизатсия дар нуқта перитектикий (P) ба охир мерасад. Дар ҳолати дигар кристаллизатсия дар нуқтаи эвтоникӣ, бо ҳосилшавии маҷмӯи намакҳои AX, BX, BY ба охир мерасад. Дар чунин диаграммаҳои муовиза - баргарданда нуқтаҳои нонвариантӣ дар як тарафи диагонали ҷуфт намакҳои системаро ташкилкунанда, ҷойгир мебошанд.

Ҷуфти намакҳо, дар мисоли мо AX+AY дар ҳарду нуқтаҳои нонвариантӣ чудо шуда, ҷуфти системаҳои стабилиро ташкил медиҳанд. Ҳамин тавр, дар системаҳои муовизаи баргарданда, агарчанде диагоналҳои стабилий набошад ҳам, ҷуфти стабилии намакҳое ҳастанд, ки ба таркиби ҳамагуна омехтаи гудохтаи система дохиланд.

Аз ин лиҳоз мо низ дар таҳқики политермаи комплекси фазагӣ ва ҳалшавандагии системаи панҷкомпонентаи Na^+ , Ca^{2+} || SO_4^{2-} , CO_3^{2-} , HCO_3^- - H_2O , зерсистемаҳои чор ва секомпонентаи онро ташкилдиҳанд асули транслятыяро, ки аз ҷониби яке аз асосгузорони асосҳои таҳлили физико-химиявӣ Лутфулло Солиев пешниҳод гардидааст, истифода намудем.

Маълумот оид ба ҳолати омӯзиши политермаи системаи панҷкомпонентаи Na^+ , Ca^{2+} || SO_4^{2-} , CO_3^{2-} , HCO_3^- - H_2O , 5 - системаҳои чор- ва 9-системаҳои секомпонентаи таркибидиҳандай он дар ҷадвали 1 муттаҳид карда шудаанд.

Ҷадвали 1. – Ҳолати омӯзиши системаи панҷкомпонентаи Na^+ , Ca^{2+} || SO_4^{2-} , CO_3^{2-} , HCO_3^- - H_2O ва зерсистемаҳои чор-секомпонентаи он

Системаҳо	К-тнокӣ	Изотерма, °C				
		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
$3\text{Na}^+ \parallel \text{SO}_4^{2-}, \text{HCO}_3^- \cdot \text{H}_2\text{O}$	3	+	+	+	+	+
$3\text{Na}^+ \parallel \text{CO}_3^{2-}, \text{HCO}_3^- \cdot \text{H}_2\text{O}$	3	+	+	+	+	+
$2\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}, 2\text{HCO}_3^- \cdot \text{H}_2\text{O}$	3	-	-	-	-	-
$\text{Ca}^{2+} \parallel \text{CO}_3^{2-}, \text{HCO}_3^- \cdot \text{H}_2\text{O}$	3	-	-	-	-	-
$\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+} \parallel 3\text{HCO}_3^- \cdot \text{H}_2\text{O}$	3	-	-	-	-	-

Ҷадвали 1 ифода менамояд, ки системаи панҷкомпонентай Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, CO_3^{2-} , $\text{HCO}_3^- \cdot \text{H}_2\text{O}$ аслан таҳқиқ нашудааст. Аз 5 - зерсистемаҳои чоркомпонента танҳо яктоаш $5\text{Na}^+ \cdot \text{SO}_4^{2-} \cdot \text{CO}_3^{2-} \cdot \text{HCO}_3^- \cdot \text{H}_2\text{O}$ дар сатҳи секомпонентагӣ таҳқиқ шуда бошад ҳам аммо, диаграммаи ҳалшавӣ ё комплексҳои фазагии онҳо низ сохта нашудаанд. Системаҳои $3\text{Ca}^{2+} \cdot \text{SO}_4^{2-} \cdot \text{CO}_3^{2-} \cdot 2\text{HCO}_3^- \cdot \text{H}_2\text{O}$, $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}, \text{CO}_3^{2-} \cdot \text{H}_2\text{O}$, $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}, \text{HCO}_3^- \cdot \text{H}_2\text{O}$, $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+} \parallel \text{CO}_3^{2-}, \text{HCO}_3^- \cdot \text{H}_2\text{O}$ умуман таҳқиқ нашуда, диаграммаҳои фазагӣ, ҳалшавандагӣ ва политетмиашон сохта нашудаанд. Дигар системаҳо, ки зерсистемаҳои секомпонентай онро ташкилдиҳанданд, дар ҳароратҳои интихобшудаи таҳқиқоти илмӣ аслан омӯҳта нашудаанд ва диаграммаҳои политетмаии ҳалшавӣ, комплексҳои фазагиашон сохта нашудаанд.

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

Дар корҳои қаблии 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, потенсиали химиявӣ ва ғайра сурат мегирад. Дар ин маврид, диаграммаи ҳолат компонентнокии тағиیرназардорад.

Ҳангоми транслятсия ба самти компонентнокии навбатӣ, диаграммаҳои ҳолати системаҳои ҷузъии аз n – компонентҳо (изотермаҳо ё политетмаҳои системаҳо) ҳамчун маълумоти ибтидой барои соҳтани диаграммаи ҳолати системаи умумӣ аз $n+1$ компонент иборатбуда муҳим мебошанд. Барои соҳтани политетмаи системаи аз n – компонент иборатбуда бо усули транслятсия, изотермаҳои ин система ҳамчун маълумоти ибтидой 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 гудохта бошад, бо истифода аз қаҷҳатҳои гармкуниӣ ва хунуккуниӣ дар термограммаҳо дар шакли политетмаҳо соҳтан қулайтар аст. Дар кори мо, усули транслятсия дар ҳарду вариант истифода шудааст.

Политетмаи системаи чоркомпонентай $5\text{Na}^+ \cdot \text{SO}_4^{2-} \cdot \text{CO}_3^{2-} \cdot \text{HCO}_3^- \cdot \text{H}_2\text{O}$ дар фосилаи ҳароратҳои $0 \div 100 \ ^\circ\text{C}$, ки иони умумии (Na^+) дорад. Изотермаи $0 \ ^\circ\text{C}$. Мувофиқи сарҷашмаҳои илмӣ системаҳои сатҳи таркиби секомпонента: $3\text{Na}^+ \cdot \text{SO}_4^{2-} \cdot \text{HCO}_3^- \cdot \text{H}_2\text{O}$; $3\text{Na}^+ \cdot \text{CO}_3^{2-} \cdot \text{HCO}_3^- \cdot \text{H}_2\text{O}$ ва $4\text{Na}^+ \cdot \text{SO}_4^{2-} \cdot \text{CO}_3^{2-} \cdot \text{H}_2\text{O}$ дар $0 \ ^\circ\text{C}$ хуб омӯҳта шудаанд. Барои онҳо якторӣ нуқтаҳои нонвариантини E_1^3 , E_2^3 ва E_3^3 бо фазаҳои мувозинатии саҳти $\text{Mb}+\text{Nk}$, $\text{Na}10+\text{Nk}$, ва $\text{Mb}+\text{Na}10$ -ро доранд, ки дар сатҳи компонентнокии умумӣ мувозинати моновариантини ҳатҳоро ифода мекунанд. Дар фазои сатҳи компонентнокии ҷор пас аз интиқоли нуқта ва маҳдудшавӣ дар шакли ифодаи нонвариантини чоркомпонента як нуқтаи нонвариантини E_1^4 – ро бо мувозинати $\text{Mb} + \text{Na}\cdot 10 + \text{Nk}$ ҳосил мекунанд.

Изотермаи $25 \ ^\circ\text{C}$. Дар изотермаи мазкур миқдори нуқтаҳои нонвариантини системаҳои секомпонента ҷунинанд: $3\text{Na}^+ \cdot \text{SO}_4^{2-} \cdot \text{HCO}_3^- \cdot \text{H}_2\text{O} - E_1^3 = \text{Mb} + \text{Nk}$; $3\text{Na}^+ \cdot \text{CO}_3^{2-} \cdot \text{HCO}_3^- \cdot \text{H}_2\text{O} - E_2^3 = \text{Mb} + \text{Tr}$, $E_3^3 = \text{Tr} + \text{Na}10$; $4\text{Na}^+ \cdot \text{SO}_4^{2-} \cdot \text{CO}_3^{2-} \cdot \text{H}_2\text{O} - E_4^3 = \text{Na}10 + \text{Mb}$. Дар натиҷаи иловай компоненти ҷорум ба яке аз системаҳои секомпонента, нуқтаҳои нонвариантӣ дар сатҳи умумӣ дар шакли трансформатсияшуда, транслятсия

гардида нүктаҳои нонвариантити E_1^4 ва E_2^4 – ро бо фазаҳои мувозинатии $Mb + Nk + Tr$ ва $Na_{10} + Tr + Mb$ ҳосил мекунанд.

Изотермаҳои 50 ва 75 °C. Дар системаи мазкур баланд шудаи ҳарорат ба тайироти фазагӣ меоварад, ки ин аз зерсистемаҳои секомпонента алоқаманд аст. Мувозинати нүктаҳои нонвариантӣ $E_1^3 = Te + Nk$ барои системаи $3Na^+ - SO_4^{2-} - HCO_3^- - H_2O$, $E_2^3 = Nk + Tr$, $E_3^3 = Na_1 + Tr$ барои системаи $3Na^+ - CO_3^{2-} - HCO_3^- - H_2O$ ва $E_4^3 = Te + Br$, $E_5^3 = Br + Na \cdot 1$ дар системаи $4Na^+ - SO_4^{2-} - CO_3^{2-} - H_2O$ мебошанд. Дар сатҳи таркиби компонентнокии навбатӣ бошад, барои система мувозинати нүктаҳои нонвариантӣ чунинанд: фазаҳои $Te + Br + Nk$ дар нүктаи нонвариантити E_1^4 ; фазаҳои $Na_1 + Br + Tr$ дар нүктаи нонвариантити E_2^4 ва фазаҳои $Nk + Br + Tr$ дар нүктаи нонвариантити E_3^4 . Чи тавре диде 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 тайироти фазагӣ дучор мешавад. Зимни таъсири муттақобилаи фазаҳои нахколит ва трона намаки омехтаи $3Na \cdot C$ ҳосил мешавад, ки ба соҳтори диаграмма низ дигаргуни ворид менамояд. Аз ин лиҳоз миқдори максималии шаклҳои геометрӣ дар системаи чоркомпоненти мазкур дар изотермаи 100 °C ба назар мерасад. Яъне, миқдори нүктаҳои нонвариантити сатҳи секомпонента 6 то аз ҷумла: $E_1^3 = Te + Nk$; $E_2^3 = Nk + 3Na \cdot C$; $E_3^3 = Tr + 3Na \cdot C$; $E_4^3 = 3Na \cdot C + Na_1$; $E_5^3 = Te + Br$ ва $E_6^3 = Br + Na_1$, сатҳи чоркомпонента бошад 4 то ($E_1^4 = Te + Nk + 3Na \cdot C$, $E_2^4 = Na_1 + Tr + Br$, $E_3^4 = Te + Tr + Br$ ва $E_4^4 = 3Na \cdot C + Tr + Te$) мебошанд.

Политермаи системаи чоркомпоненти $3Ca^{2+} - SO_4^{2-} - CO_3^{2-} - 2HCO_3^- - H_2O$ дар фосилаи $0 \div 100$ °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 пайвастҳои зерини химиявии калсийдор ба мушоҳида мерасанд: $CaSO_4$; $CaCO_3$; $Ca(HCO_3)_2$ ва H_2O . Ҳамзамон он ба системаҳои секомпоненти $2Ca^{2+} - SO_4^{2-} - CO_3^{2-} - H_2O$, $2Ca^{2+} - SO_4^{2-} - 2HCO_3^- - H_2O$ ва $2Ca^{2+} - CO_3^{2-} - 2HCO_3^- - H_2O$ чудо мешаванд. Таҳлили адабиёт ифода мекунад, ки системаи чоркомпонента умуман омухта нашудааст ва барои онҳо нүктаҳои нонвариантити зерини эвтоникии оддӣ имконпазиранд: $2Ca^{2+} - SO_4^{2-} - CO_3^{2-} - H_2O - E_1^3 = Gp + CaH$; $2Ca^{2+} - SO_4^{2-} - 2HCO_3^- - H_2O - E_2^3 = Cc + CaG$ ва $2Ca^{2+} - CO_3^{2-} - 2HCO_3^- - H_2O - E_3^3 = Gp + Cc$. Дар натиҷаи иловаи компоненти навбатӣ ба яке аз зерсистемаҳо нүктаи нонвариантити зерин ҳосил мешавад, ки онро ба таври математикӣ чунин ифода мекунанд: $E_1^3 + E_2^3 + E_3^3 \rightarrow E_1^4 = Gp + Cc + CaH$. Чунин мувозинати фазагӣ дар системаи мазкур дар фосилаи ҳароратҳои $0 \div 100$ °C ҳосил мебошад.

Политермаи системаи чоркомпоненти мувозизаи обӣ-намакии сулфатҳо, карбонатҳои натрий ва калсий дар фосилаи $0 \div 100$ °C. Изотермаи 0 °C. Системаҳои секомпоненти $4Na^+ - SO_4^{2-} - CO_3^{2-} - H_2O$; $2Na^+ - Ca^{2+} - 2SO_4^{2-} - H_2O$; $2Na^+ - Ca^{2+} - 2CO_3^{2-} - H_2O$ ва $2Ca^{2+} - SO_4^{2-} - 2HCO_3^- - H_2O$ системаи чоркомпоненти Na^+ , $Ca^{2+} \parallel SO_4^{2-}$, CO_3^{2-} - H_2O -ро муттаҳид мекунад. Дар изотермаи 0 °C барои онҳо 5 нүктаи нонвариантӣ ҳос буда, транслятсияшон ба сатҳи чоркомпонентагӣ ба ҳосилшавии 3 нүктаи нонвариантити E_1^4 , E_2^4 ва E_3^4 меоварад, ки барои онҳо фазаҳои мувозинатии $Mb + Gl + Na \cdot 10$, $Gp + Cc + Gl$ ва $Mb + Gp + Gl$ мавҷуд аст.

Изотермаи 25 °C. Миқдори ифодаҳои геометрӣ, хусусан нүктаҳои нонвариантӣ дар яке аз зерсистемаҳои секомпонента – системаи $2Na^+ - Ca^{2+} - 2SO_4^{2-} - H_2O$ бештар ба назар мерасад. Ин ба тағйироти фазагӣ дучор гардиданӣ он алоқаманд буда, ифода мекунад, ки аз таъсири компонентҳои калсит ва декагидрати карбонати натрий фазаи нави глауберит, ки намаки дучандай сулфатҳои натрий ва калсий мебошад, алоқаманд аст. Бинобар ин мувозинатҳои нонвариантӣ дар онҳо чунин мебошад: $Mb + Na \cdot 10$ барои нүктаи E_1^3 ; $Gb + Mb = E_2^3$; $Gp + Gb = E_3^3$; $Cc + Gp = E_4^3$; $Na \cdot 10 + Gl = E_5^3$ ва $Gl + Cc$. Ҳамзамон барои таркиби чоркомпонента бошад фазаҳои мувозинатии $Mb + Na_{10} + Gb$, $Gb + Gp + Cc$, $Na_{10} + Gl + Gb$, $Gl + Gb + Cc$ дар нүктаҳои 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 чоркомпонентай зерин тағиироти фазагӣ ба назар мерасад, ки тағиир ёфтани миқдори шаклҳои геометрий меоварад. Чунин тағиирот дар шакли дегидрататсияи кристаллогидратҳои намакҳои миёна ва дучанда меоварад. Мисол, дар системаи секомпонентай $4\text{Na}^+ - \text{SO}_4^{2-} - \text{CO}_3^{2-} - \text{H}_2\text{O}$ фазаҳои мирабилит ва декагидрати карбонати натрий аз таъсири ҳарорат яке 10 молекула ва дигаре 9 молекулаи обашонро гум карда, ба тенардит ва термонатрит тебдил мёбанд. Инчунин, тенардит ва термонатрит ба таъсири химиявӣ дучор шуда, фазаи нави беркеитро ҳосил мекунанд, ки сохтори диаграммаро дар системаи мазкур барои изотермаи 50 °C тағиир медиҳад. Системаи дар сатҳи таркиби чоркомпонента дорои чунин нуқтаҳои нонвариантӣ бо фазаҳои саҳти мувозинатӣ мебошанд: $E_8^3 = \text{Te} + \text{Br} + \text{Gp}$; $E_9^3 = \text{Gb} + \text{Gp} + \text{Cc}$; $E_{10}^3 = \text{Br} + \text{Pr} + \text{Na1}$; $E_{11}^3 = \text{Gb} + \text{Pr} + \text{Cc}$; $E_{12}^3 = \text{Gb} + \text{Pr} + \text{Br}$.

Изотермаи 75 °C. Ҳангоми таҳқиқот маълум шуд, ки дар чунин системаи миқдори максималии шаклҳои геометрий дар изотермаи 75 °C ба назар мерасад, ки ин ба ҳосилшавии фазаи нави мувозинатии $5\text{Ca}\cdot\text{Na}\cdot3$ 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 дучандай глауберит ба назар мерасад. Мувозинати нуқтаҳои нонвариантӣ системаҳои секомпонентай системаи таҳқиқшаванда чунин мебошанд: $E_4^3 = \text{Te} + \text{Br}$; $E_5^3 = \text{Br} + \text{Na1}$ дар системаи $4\text{Na}^+ - \text{SO}_4^{2-} - \text{CO}_3^{2-} - \text{H}_2\text{O}$, $E_{12}^3 = \text{Te} + \text{Gb}$; $E_{13}^3 = \text{Gb} + 5\text{Ca}\cdot\text{Na}\cdot3$; $E_{14}^3 = \text{Gp} + 5\text{Ca}\cdot\text{Na}\cdot3$ дар системаи $2\text{Na}^+ - \text{Ca}^{2+} - \text{SO}_4^{2-} - \text{H}_2\text{O}$, $E_8^3 = \text{Cc} + \text{Gp}$ дар системаи $2\text{Ca}^{2+} - \text{CO}_3^{2-} - \text{SO}_4^{2-} - \text{H}_2\text{O}$, $E_{15}^3 = \text{Na1} + \text{Pr}$; $E_{16}^3 = \text{Pr} + \text{Cc}$ дар системаи $2\text{Na}^+ - \text{Ca}^{2+} - \text{CO}_3^{2-} - \text{H}_2\text{O}$. Фазаҳои мувозинатии нуқтаҳои нонвариантӣ чоркомпонента инҳоянд: $E_9^4 = \text{Te} + \text{Br} + \text{Gb}$; $E_{10}^4 = \text{Na1} + \text{Br} + \text{Pr}$; $E_{11}^4 = 5\text{Ca}\cdot\text{Na}\cdot3 + \text{Gp} + \text{Cc}$; $E_{12}^4 = \text{Br} + \text{Gb} + 5\text{Ca}\cdot\text{Na}\cdot3$; $E_{13}^4 = \text{Cc} + \text{Pr} + 5\text{Ca}\cdot\text{Na}\cdot3$ ва $E_{14}^4 = \text{Br} + \text{Pr} + 5\text{Ca}\cdot\text{Na}\cdot3$.

Изотермаи 100 °C. Дар изотермаи 100 °C аз таъсири ҳарорат фазаи дар 75 °C стабилии $5\text{Ca}\cdot\text{Na}\cdot3$ нест шуда, сохтори диаграммаи комплекси фазагиро нисбаттан соддатар менамояд. Миқдори нуқтаҳои нонвариантӣ сатҳи таркиби секомпонентай системаи мувозизаи таҳқиқшаванда чунин аст: $4\text{Na}^+ - \text{SO}_4^{2-} - \text{CO}_3^{2-} - \text{H}_2\text{O} - E_5^3 = \text{Te} + \text{Br}$, $E_6^3 = \text{Br} + \text{Na1}$; системаи $2\text{Na}^+ - \text{Ca}^{2+} - 2\text{SO}_4^{2-} - \text{H}_2\text{O} - E_{13}^3 = \text{Te} + \text{Gb}$, $E_{14}^3 = \text{Gb} + \text{Gp}$; системаи $2\text{Ca}^{2+} - \text{CO}_3^{2-} - \text{SO}_4^{2-} - \text{H}_2\text{O} - E_9^3 = \text{Cc} + \text{Gp}$; системаи $2\text{Na}^+ - \text{Ca}^{2+} - 2\text{CO}_3^{2-} - \text{H}_2\text{O} - E_{15}^3 = \text{Na1} + \text{Pr}$, $E_{16}^3 = \text{Pr} + \text{Cc}$. Нуқтаҳои нонвариантӣ сатҳи таркиби чоркомпонентае, ки дар натиҷаи маҳдудшавии ҳатҳои моновариантӣ ҳосил шудаанд, бо фазаҳои саҳти мувозинатиашон чунишанд: $E_9^4 = \text{Te} + \text{Br} + \text{Gb}$; $E_{10}^4 = \text{Na1} + \text{Br} + \text{Pr}$; $E_{11}^4 = \text{Gb} + \text{Gp} + \text{Cc}$; $E_{12}^4 = \text{Cc} + \text{Gb} + \text{Pr}$ ва $E_{13}^4 = \text{Br} + \text{Pr} + \text{Gb}$.

Политермаи системаи чоркомпонентай обӣ-намакии мувозизаи сулфатҳо, гидрокарбонатҳои натрий ва қалсий 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 секомпонентай 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 якторӣ нуқтаҳои нонвариантӣ ҳосил мебошанд, ки инҳоянд: $E_1^3 = \text{Mb} + \text{Nk}$, $E_2^3 = \text{Nk} + \text{CaH}$, $E_3^3 = \text{Gp} + \text{CaH}$ ва $E_4^3 = \text{Mb} + \text{Gp}$. Нуқтаҳои нонвариантӣ дар натиҷаи транслятысия ҳосилшудаи изотермаи 0 °C E_3^4 ва E_4^4 буда, дар онҳо фазаҳои $\text{Gp} + \text{Mb} + \text{Nk}$ ва $\text{Gp} + \text{Nk} + \text{CaH}$ дар мувозинат қарор доранд.

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

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

Чунин табдилот мувозинатро дар нүктахое, ки дар он мирабилит мавчуд буд, тафир медиҳад. Мисоли ин нүктахо E_1^3 ва E_5^3 мебошанд, ки ҳолати фазавии $\text{Te} + \text{Nk}$ ва $\text{Gb} + \text{Te}$ – ро ифода мекунанд.

Изотермаи 75 °C. Ифодаҳои геометрие, ки дар маҳдудшавии фазои компонентнокии умумӣ нүктаҳои нонвариантни сатҳи компонентнокии умумиро ҳосил мекунанд, дар муқоиса ба изотермаи 50 °C зиёдтаранд 16 бар 18. Ин аз таъсири муттақобилаи байни кисмҳои таркибӣ дар системаи секомпонентаи $2\text{Na}^+ - \text{Ca}^{2+} - 2\text{SO}_4^{2-} - \text{H}_2\text{O}$ вобаста буда, дар он ҳангоми таъсир ҳосилшавии фазаи мувозинатии $5\text{Ca}\cdot\text{Na}\cdot3$ дар байни сулфатҳои натрий ва калсий ба назар мерасад. Дар маҷмуъ миқдори нүктаҳои нонвариантни сатҳи секомпонента бо фазаҳои мувозинатӣ дар онҳо чунин мебошад: $E_9^3 = \text{Nk} + \text{Te}$; $E_{10}^3 = \text{CaH} + \text{Nk}$; $E_{11}^3 = \text{Gp} + \text{CaH}$; $E_{12}^3 = \text{Te} + \text{Gp}$; $E_{13}^3 = \text{Gb} + 5\text{Ca}\cdot\text{Na}\cdot3$; $E_{14}^3 = 5\text{Ca}\cdot\text{Na}\cdot3 + \text{Gp}$ ва мувозинати нүктаҳои сатҳи чоркомпонента бошанд, инҳоянд: $\text{Nk} + \text{Te} + \text{Gb} = E_5^4$, $\text{CaH} + \text{Gp} + 5\text{Ca}\cdot\text{Na}\cdot3 = E_6^4$, $\text{Gb} + \text{CaH} + \text{Nk} = E_7^4$, $\text{Gb} + \text{CaH} + 5\text{Ca}\cdot\text{Na}\cdot3 = E_8^4$.

Изотермаи 100 °C. Афзоиши ҳарорат аз 75 то 100 °C яке аз зерсистема-системаи $3\text{Na}^+ - \text{CO}_3^{2-} - \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$ – ро ба тафироти фазагӣ дучор мешавад. Зимни таъсири муттақобилаи фазаҳои нахколит ва трона намаки омехтаи $3\text{Na}\cdot\text{C}$ ҳосил мешавад, ки ба соҳтори диаграмма низ дигаргуни ворид менамояд. Аз ин лиҳоз миқдори максималии шаклҳои геометрӣ дар системаи чоркомпонентаи мазкур дар изотермаи 100 °C ба назар мерасад. Яъне, нүктаҳои нонвариантин сатҳи чоркомпонента $E_6^4 = \text{Nk} + \text{Te} + \text{Gb}$; $E_7^4 = \text{CaH} + \text{Gb} + \text{Gp}$; $E_8^4 = \text{Gb} + \text{CaH} + \text{Nk}$ мебошанд.

Политермаи системаи чоркомпонентаи обӣ-намакии мувозизаи карбонатҳо ва гидрокарбонатҳои натрий ва калсий дар фосилаи ҳароратҳои 0–100 °C. Изотермаи 0 °C. Системаҳои секомпонентаи зерин: $3\text{Na}^+ - \text{CO}_3^{2-} - \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$; $2\text{Na}^+ - \text{Ca}^{2+} - \text{CO}_3^{2-} - \text{H}_2\text{O}$; $\text{Na}^+ - \text{Ca}^{2+} - \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$ ва $\text{Ca}^{2+} - \text{CO}_3^{2-} - \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$ таркиби чор самти пирамидаи диаграммаи системаи Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{CO}_3^{2-}$, $\text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$ мебошанд. Дар изотермаи 0 °C барои онҳо 5 нүктаи нонвариантӣ ҳос буда, транслятсияшон ба сатҳи чоркомпонентагӣ ба ҳосилшавии 3 нүктаи нонвариантии E_8^4 , E_9^4 ва E_{10}^4 меовараад, ки барои онҳо фазаҳои мувозинатии $\text{Na}\cdot10 + \text{Nk} + \text{Gl}$, $\text{Cc} + \text{Gl} + \text{CaH}$ ва $\text{Nk} + \text{CaH} + \text{Gl}$ мавчуд аст.

Изотермаи 25 °C. Миқдори ифодаҳои геометрӣ, хусусан нүктаҳои нонвариантӣ дар ду зерсистемаҳои секомпонента – системаи $3\text{Na}^+ - \text{CO}_3^{2-} - \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$ бештар ба назар мерасад. Ин ба тафироти фазагӣ дучор гардидаи он алоқаманд буда, ифода мекунад, ки аз таъсири компонентҳои нахколит ва декагидрати карбонати натрий фазаи нави глауберит, ки намаки дучандай сулфатҳои натрий ва калсий мебошад, алоқаманд аст. Бинобар ин мувозинатҳои нонвариантӣ дар онҳо чунин мебошад: $\text{Na}\cdot10 + \text{Tr}$ барои нүктаи E_1^3 ; $\text{Tr} + \text{Nk}$ барои нүктаи E_2^3 . Мувозинатҳои фазагии дигар нүктаҳои нонвариантӣ дар сатҳи секомпонентаи таркиб $\text{Na}\cdot10 + \text{Gl} = E_3^3$; $\text{Gl} + \text{Cc} = E_4^3$; $\text{Cc} + \text{CaH} = E_5^3$ ва $\text{CaH} + \text{Nk} = E_6^3$. Дар баробари ин барои таркиби чоркомпонента бошад фазаҳои мувозинатии $\text{Na}\cdot10 + \text{Tr} + \text{Gl}$, $\text{Tr} + \text{Nk} + \text{CaH}$, $\text{Cc} + \text{Gl} + \text{CaH}$, $\text{Tr} + \text{CaH} + \text{Gl}$ дар нүктаҳои E_{11}^4 , E_{12}^4 , E_{13}^4 ва E_{14}^4 дар мувозинат мебошанд.

Изотермаҳои 50 ва 75 °C. Баландшавии ҳарорат аз 25 то 50 ва аз 50 то 75 °C дар системаи чоркомпонентаи зерин тафироти фазагӣ ба назар мерасад, аммо ин тафироти фазагӣ миқдори шаклҳои геометриро тафир намедиҳад. Дар ҳарду изотерма онҳо баробар мебошанд. Тафироти фазагии изотермаҳои мазкур дар дегидрататсияи 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 фазаи нави мувозинатии $3\text{Na}\cdot\text{C}$ алоқаманд мебошад. Ташаккули чунин фаза дар зерсистемаи $3\text{Na}^+ - \text{CO}_3^{2-} - \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$ ба назар расида, он зимни таъсири муттақобилаи кристаллогидрати намаки омехтаи трона ва нахколит ба мушоҳида мерасад. Мувозинати нүктаҳои нонвариантни системаҳои секомпонентаи системаи

тахқиқшаванда чунин мебошанд: $E_{17}^3 = \text{Na1} + \text{Tr}$; $E_{18}^3 = \text{Tr} + 3\text{Na}\cdot\text{C}$; $E_{19}^3 = 3\text{Na}\cdot\text{C} + \text{Nk}$ дар системаи $3\text{Na}^+ - \text{CO}_3^{2-} - \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$, $E_{15}^3 = \text{Na1} + \text{Pr}$; $E_{16}^3 = \text{Pr} + \text{Cc}$ дар системаи $2\text{Na}^+ - \text{Ca}^{2+} - 2\text{CO}_3^{2-} - \text{H}_2\text{O}$, $E_{20}^3 = \text{Cc} + \text{CaH}$ дар системаи $2\text{Ca}^{2+} - \text{CO}_3^{2-} - 2\text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$, $E_{21}^3 = \text{CaH} + \text{Nk}$ дар системаи $\text{Na}^+ - \text{Ca}^{2+} - 3\text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$. Фазаҳои мувозинатии нүктаҳои нонвариантити чоркомпонента инҳоянд: $E_{14}^4 = \text{Na1} + \text{Tr} + \text{Pr}$; $E_{15}^4 = \text{Cc} + \text{Pr} + \text{CaH}$; $E_{16}^4 = 3\text{Na}\cdot\text{C} + \text{Nk} + \text{CaH}$; $E_{17}^4 = 3\text{Na}\cdot\text{C} + \text{Tr} + \text{Pr}$ ва $E_{18}^4 = 3\text{Na}\cdot\text{C} + \text{Pr} + \text{CaH}$.

Политермаи соҳтори комплекси фазагии системаи



Вижагии асосии соҳтани 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 соҳта 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 соҳтани 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 соҳтори система зиёд мешавад: нүктаҳои нонвариантӣ ба каҷхатҳои моновариантӣ, каҷхатҳои моновариантӣ ба майдонҳои дивариантӣ, майдонҳои дивариантӣ ба ҳаҷм ва ғайра табдил меёбанд.

Шаклҳои геометрии мазкур дар сатҳи таркиби умумии системаи $n+1$ - компонента, ҳангоми воҳурии байнҳамдигар, тасвирҳои геометрии системаи умумиро ҳосил меқунанд. Нүктаҳои нонвариантӣ ҳангоми буриш каҷхатҳои моновариантиро ба вучуд меоранд. Каҷхатҳои моновариантӣ майдонҳои дивариантро ва майдонҳои дивариантӣ ҳаҷм ва диаграммаи сарбасти комплекси фазавии системаи умумиро ташкил медиҳанд. Комплекси фазагӣ дар тасвирҳои геометрӣ ба таври зерин пешбинӣ мешаванд.

Нүктаҳои нонвариантӣ. Азбаски мувофиқи қоиди фазаҳои Гибbs буриши тасвирҳои геометрӣ дар ҳолате имконпазир аст, ки онҳо аз яқдигар бо як фаза фарқ кунанд. Нүктаҳои эҳтимолии нонвариантити системаи умумиро метавон ба таври математикӣ бо усули пайвастшавӣ (сочетание) пайдо кард. Нүктаҳои нонвариантити системаҳои чузъӣ, ки аз яқдигар бо як фаза фарқ меқунанд, бо ҳам пайваст мешаванд. Ин усул ба таври шартӣ транслятсияи «дутарафа» номида мешавад. Дар диаграммаи мувозинати фазагӣ ин тавассути буриши каҷхатҳои моновариантӣ, ки аз нүктаҳои нонвариантити системаҳои чузъӣ (ду намуди гуногун) сарчашма мегиранд, амалӣ мегардад (расми 4. а). Дар расми 4, а, аломати секунҷа маънои онро дорад, ки нүктаҳои чоргонаи E_1^4 ва E_2^4 ба системаҳои гуногун тааллук доранд ва бо як нүктаи сегонаи нонвариантӣ алоқаманданд, ки дар минтақаи таркиби чоргона ба каҷхати моновариантӣ мегузарад. Дар транслятсияи дутарафа имкони пайдоиши гурӯҳи нүктаҳои нонвариантӣ бо таркиби фазавии яҳхелаи таҳшинҳо вучуд дорад. Дар изотермаҳои комплекси фазавӣ онҳо ҳамчун як нүктаи нонвариантӣ, ки аз буриши зиёда аз ду каҷхати моновариантӣ ба вучуд омадаанд, инъикос меёбанд.

Нүктаҳои нонвариантити системаҳои таркибии чузъӣ, ки дар дигар системаҳои чузъӣ шариконе барои пайвастшавӣ пайдо накардаанд, ба минтақаи таркиби умумӣ аз рӯйи намуди «яктарафа» транслятсия мешаванд. Дар диаграммаи комплекси фазавӣ чунин транслятсия тавассути буриши каҷхати моновариантӣ, ки аз нүктаи нонвариантити системаи чузъӣ оғоз меёбад, бо каҷхати моновариантӣ, ки дар байни нүктаҳои нонвариантити системаи умумӣ мегузарад (расми 4, б, нүктаи E_2^5), амалӣ мегардад. Имконияти пайдоиши нүктаҳои нонвариантити системаи умумӣ тавассути буриши каҷхатҳои моновариантӣ, ки танҳо дар байни нүктаҳои нонвариантити системаи умумӣ мегузаrand, вучуд дорад (расми 4, в, нүктаи E_4^5). Ин гуна нүктаҳои нонвариантӣ ба таври «мобайни» муайяншуда номида мешаванд.

Нүктаҳои нонвариантиси системаи умумӣ, ки бо усули транслятсия муайян шудаанд, метавонанд аз меъёри зарурӣ барои сарбости шаклҳои геометрӣ ва сохтани диаграммаи комплекси фазавӣ бештар бошанд. Дар ин ҳолат, нүктаҳои нонвариантӣ муайян карда мешаванд, ки дар сарбастшавии ифодаҳои геометрӣ иштирок намекунанд ва ҳамчун изофӣ рад карда мешаванд.

Хатҳои моновариантӣ. Каҷхатҳои моновариантиси СБК пайдоиши духелагӣ доранд. Ин маъни онро дорад, ки онҳо метавонанд аз ду манбаи гуногун дар дохили диаграммаи комплекси фазагӣ ба вучуд оянд. Яке аз онҳо метавонад ҳамчун натиҷаи транслятсияи нүктаҳои нонвариантиси системаҳои ҷузъӣ ба минтақаи таркиби умумӣ ба вучуд оянд (онҳо дар расми 4, а бо хатҳои фосиладор 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 пайвасткунандай нүктаҳои нонвариантиси системаи умумӣ буда, дар расми 4, б бо хатҳои ғафси яклухт ишора шудаанд ($E_1^5-E_2^5$; $E_1^5-E_4^5$; $E_3^5-E_4^5$). Навъи аввали каҷхатҳои моновариантӣ метавонанд пешбинӣ карда шаванд. Онҳо шакли транслятсияшудаи нүктаҳои нонвариантиси системаҳои ҷузъӣ ба минтақаи таркиби умумӣ мебошанд. Боқимонда ҳангоми сохтани диаграммаи сарбости комплекси фазагии системаи таҳқиқшавандай Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, CO_3^{2-} , $\text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$ муайян карда мешаванд.

Ҳангоми гузаронидани каҷхатҳои моновариантӣ дар байни нүктаҳои нонвариантиси системаи умумӣ, мумкин аст ду ва зиёда аз он каҷхатҳо бо таркиби фазавии яхелай таҳшинҳо пайдо шаванд. Дар ин ҳолат, каҷхатҳои моновариантӣ муайян карда мешаванд, ки дар сарбости шаклҳои сохтори диаграммаи комплекси фазавии системаи бисёркомпонентии таҳқиқшаванда иштирок намекунанд ва ҳамчун изофӣ рад карда мешаванд.

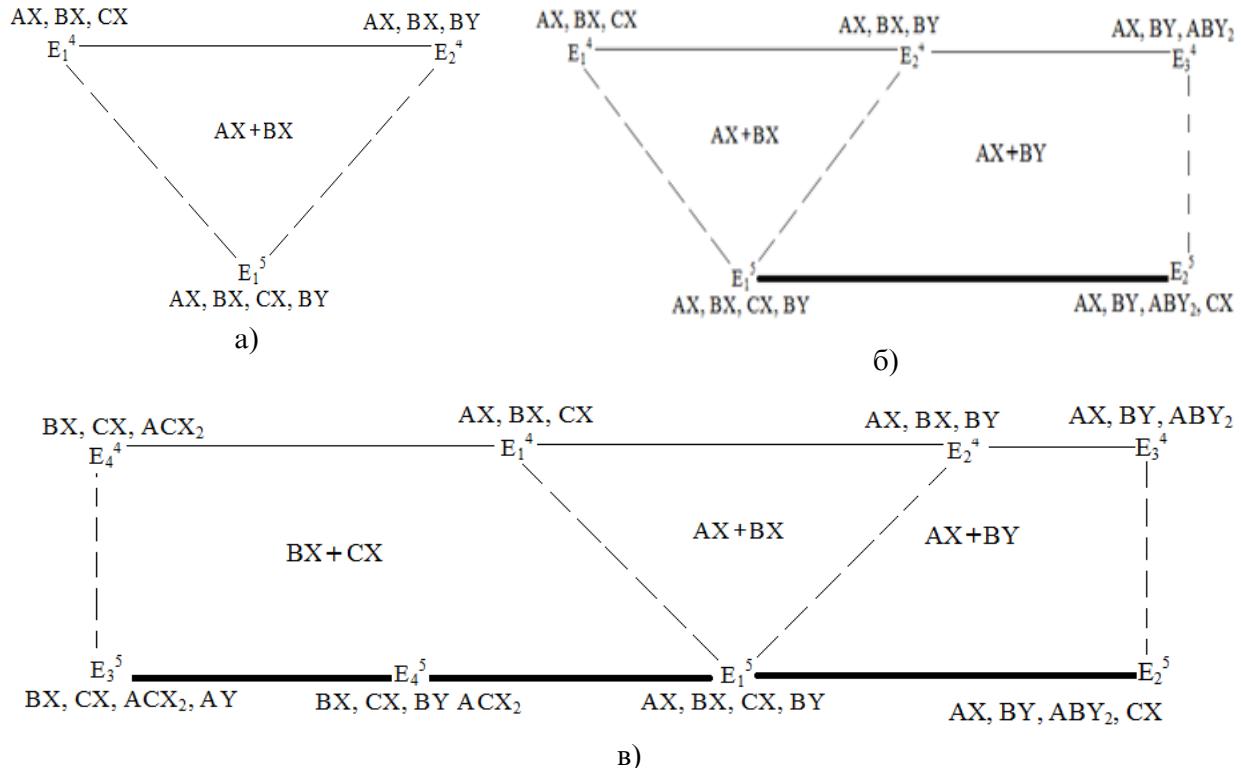
Майдонҳои дивариантӣ. Майдонҳои дивариантӣ дар СБК метавонанд дар натиҷаи транслятсияи каҷхатҳои моновариантиси системаҳои ҷузъӣ ба минтақаи системаи умумӣ ба вучуд оянд. Ин раванд ба мо имкон медиҳад, ки муносибатҳои мураккаби фазагиро дар доираи системаҳои мураккаб дарк кунем. Масалан, майдонҳои аз ду фаза сери $\text{AX}+\text{BX}$, $\text{AX}+\text{BY}$ ва $\text{BX}+\text{CX}$ дар расми 4, ки дар натиҷаи транслятсияи каҷхатҳои моновариантиси $E_1^4-E_2^4$, $E_2^4-E_3^4$ и $E_1^4-E_4^4$ ба минтақаи таркиби панҷкомпонента ба вучуд омадаанд, инчунин дар натиҷаи сарbast шудани майдонҳо бо каҷхатҳои моновариантӣ, ки дар байни нүктаҳои нонвариантиси системаи умумӣ мегузаранд.

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

- муайян кардани нүктаҳои нонвариантиси системаи умумӣ тавассути пайваст кардани нүктаҳои нонвариантиси системаҳои қисман (ғайриякхела);
- муайян кардани нүктаҳои нонвариантиси системаи умумӣ дар ҳолати транслятсияи яктарафаи нүктаҳои нонвариантиси системаҳои ҷузъӣ;
- тарҳи пешакии тасвири диаграммаи фазагии системаи таҳқиқшавандай таркиби якум;
- санчиши транслятсияи каҷхатҳои моновариантиси системаҳои ҷузъӣ ба минтақаи таркиби умумӣ;
- ёфтани нүктаҳои имконпазири нонвариантиси мобайнӣ, ки транслятсияи каҷхатҳои моновариантиси системаҳои ҷузъиро ба минтақаи таркиби умумӣ таъмин мекунанд;
- сохтани диаграммаи комплекси фазагии СБК дар тақриби дуюм;
- санчиши зарурати транслятсияи нүктаҳои нонвариантиси системаҳои ҷузъӣ ба минтақаи таркиби умумӣ дар зиёда аз як самт;
- санчиши иштироки нүктаҳои нонвариантиси системаи умумӣ дар сарbast гардидани тасвирҳои геометрии система ва рад кардани нүктаҳои зиёдатӣ;
- санчиши иштироки каҷхатҳои моновариантиси системаи умумӣ дар сарbast намудани тасвирҳои геометрӣ ва рад кардани каҷхатҳои зиёдатӣ;

- санчиши мавчудияти майдонҳои дивариантӣ, ки бо маҳдуд кардани сатҳҳо бо каҷхатҳои моновариантӣ, ки дар байни нуқтаҳои нонвариантии системаи умумӣ мегузараанд;

- соҳтани диаграммаи комплекси фазагии СБК дар варианти ниҳоӣ.



Расми 4. – Транслятсияи шаклҳои геометрии фрагменти системаи A, B, C || X, Y - H₂O:
а) дутарафа; б) яктарафа; в) мобайни

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

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

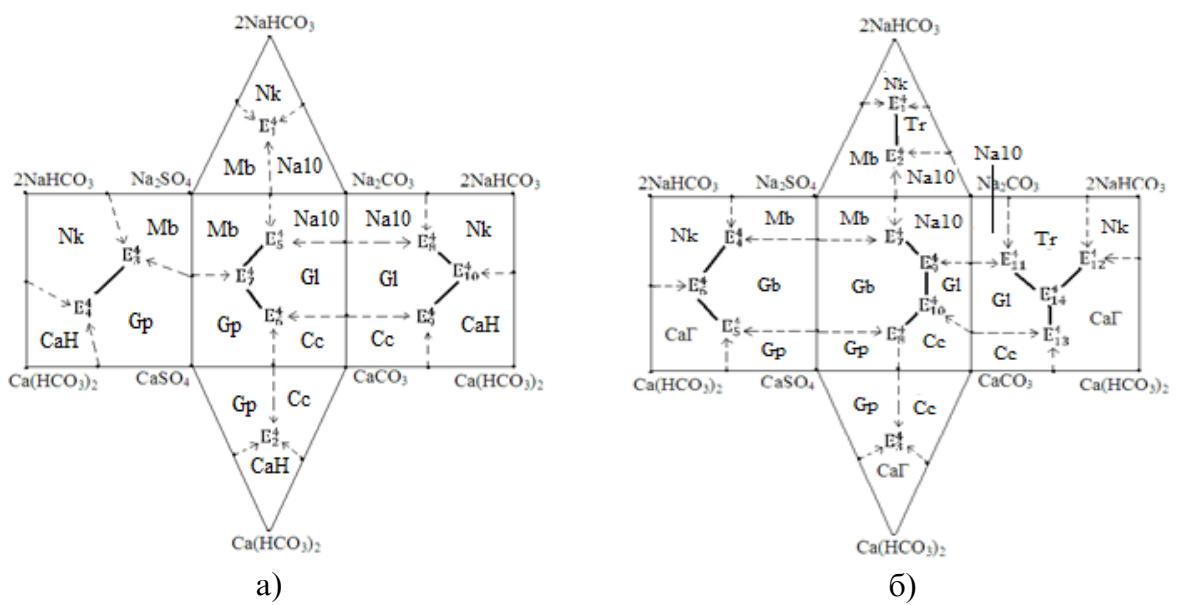
Системаи панҷкомпонентай таҳқиқшаванд 5 зерсистемаи чоркомпонентаро дар бар мегирад: 4Na⁺–SO₄²⁻–CO₃²⁻–HCO₃⁻–H₂O; 3Ca²⁺–SO₄²⁻–CO₃²⁻–2HCO₃⁻–H₂O; Na⁺, Ca²⁺ || SO₄²⁻, CO₃²⁻–H₂O; Na⁺, Ca²⁺ || SO₄²⁻, HCO₃⁻–H₂O; Na⁺, Ca²⁺ || CO₃²⁻, HCO₃⁻–H₂O. Ду системаи аввал намакҳоро бо иони умумӣ дар бар мегиранд. Байни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

Усули транслятсия, ки аз ҷониби яке аз асосгузорони риштai асосҳои таҳлили физико-химияӣ, 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 мейёбад.

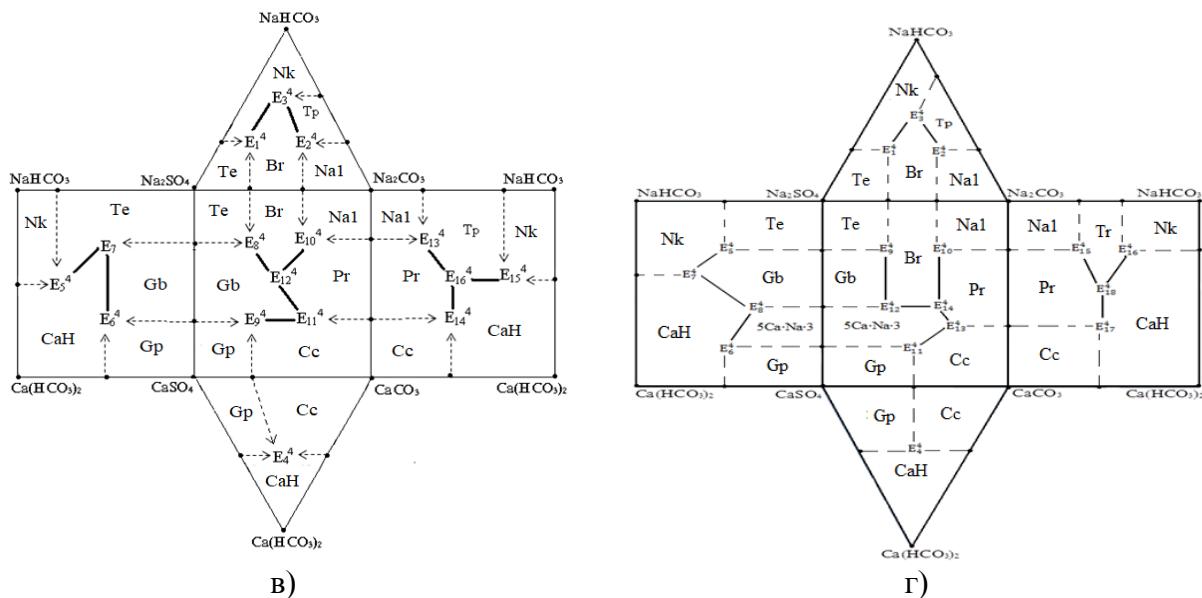
Чадвали 2. – Нүктахой нонвариантай чорчандай системаи Na^+ , $\text{Ca}^{2+}\|\text{SO}_4^{2-}$, CO_3^{2-} , HCO_3^- - H_2O дар худуди ҳароратхой 0÷100 °C

Изотерма, °C	Нүктахой нонвариантай	Фазаҳои сахти мувозинатӣ	Нүктахой нонвариантай	Фазаҳои сахти мувозинатӣ
1	2	3	4	5
0 °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 °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 °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 °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 °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	$\text{Pr} + 3\text{Na} \cdot \text{C} + \text{CaH}$

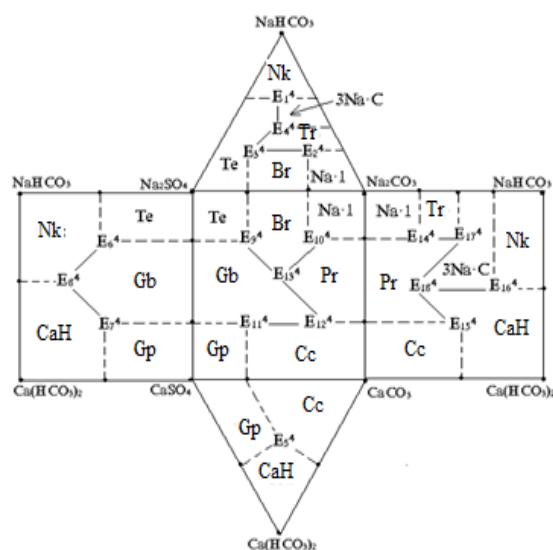
Чӣ хеле, ки аз ҷадвали 2 дида мешавад, миқдори нүктахой нонвариантай дар изотермаҳо гуногун мебошанд. Ин аз навъи система ва ҳосиятҳои моддаҳои қисмҳои таркибиашон вобастагӣ дорад. Дар асоси далелҳои ҷадвали 2 сатҳи таркиби чоркомпонентай призмаи кушодаи диаграммаи комплекси фазагии системаи иборат аз катионҳои натрий, калсий ва анионҳои сулфат, карбонат, гидрокарбонат соҳта шуда, дар расми 5 оварда шудааст. Дар призмаи кушода шаклҳои геометрии қисми намакҳои системаи таҳқиқшаванда ифодай худро ёфтаанд.



a)



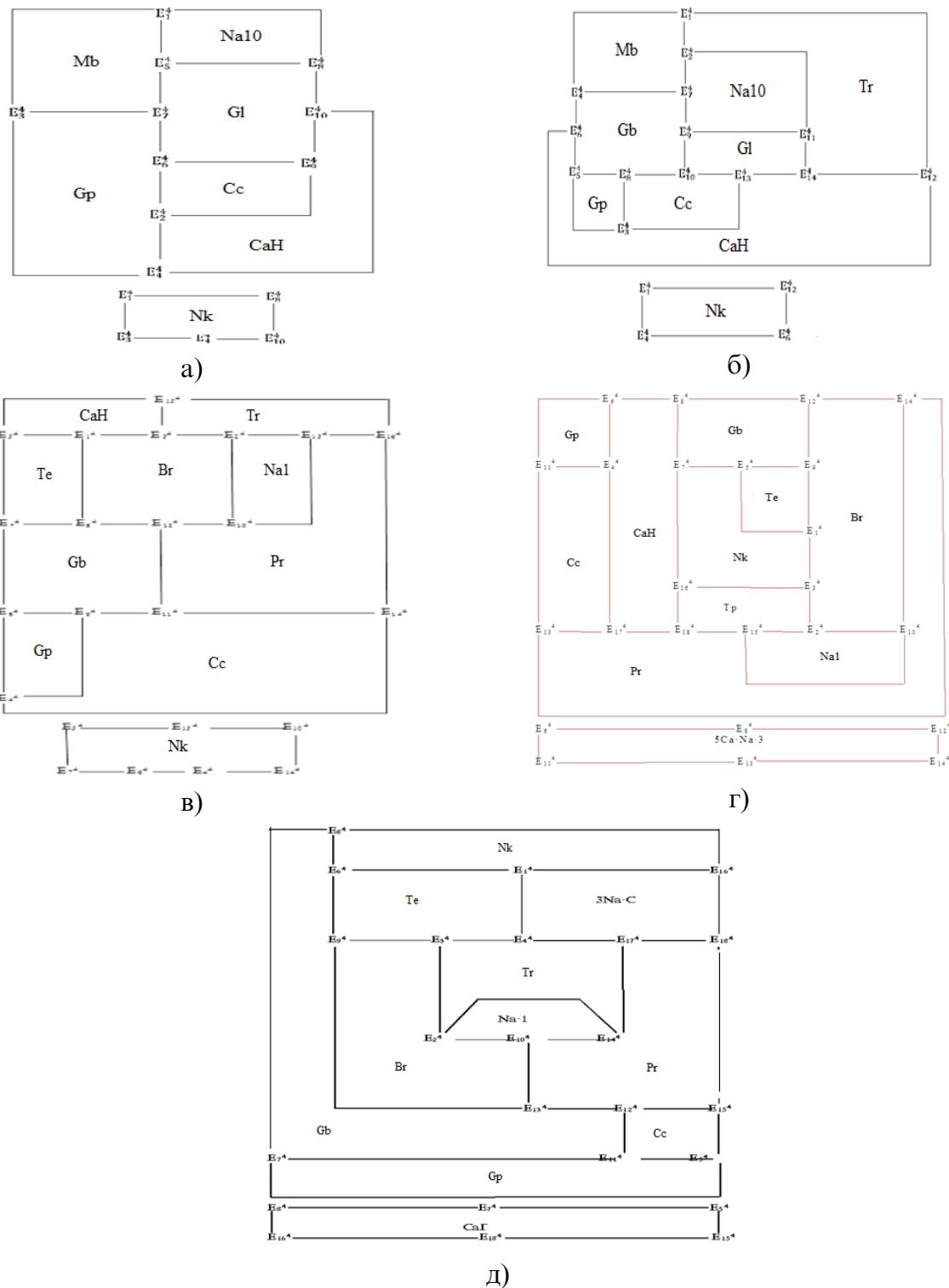
6)



д)

Расми 5. – Изотермаю призмал күштөдай чорчандай системал
 $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+} \parallel \text{CO}_3^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$: а) 0 °C; б) 25 °C; в) 50 °C; г) 75 °C; д) 100 °C

Барои соддагардонии минбаъда диаграммаҳои дар расми 5 овардашуда, масалан, муттаҳид карданӣ майдонҳои якхелай кристаллизатсияи фазаҳои саҳтҳои 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 саҳтҳои мувозинатӣ нигоҳ дошта мешавад. Чунин диаграммаҳо метавонанд асос барои тасвири системаи таҳқиқшаванда дар сатҳи поликомпонентӣ бо усули транслятсия гарданд, яъне тадбики принсипи мутобиқати ифодаҳои соҳтори системаҳои ҷузъӣ ва умумӣ дар як диаграмма.



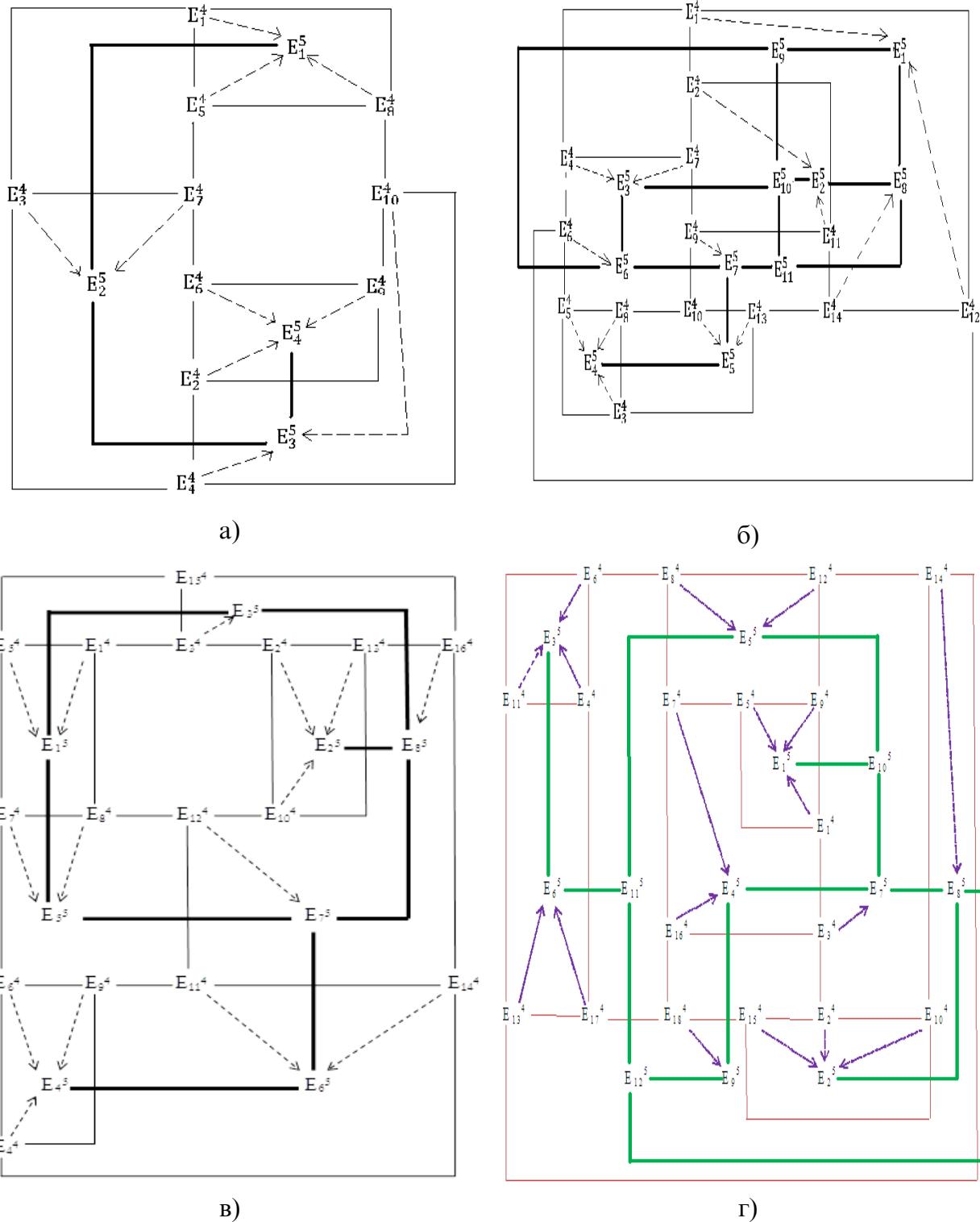
Расми 6. – Шакли муттаҳидшудаи диаграммаи сатҳи таркиби чорчандай системаи Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{CO}_3^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$: а) 0°C ; б) 25°C ; в) 50°C ; г) 75°C ; д) 100°C

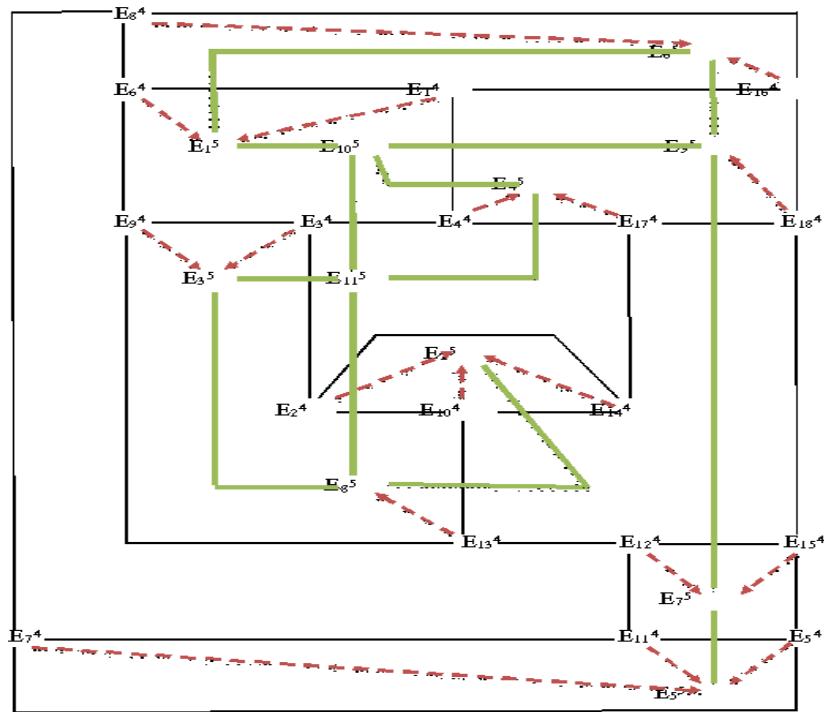
Дар асоси өздөнгөлдөрдүү 2 дар системасынан панчкомпоненталар Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, CO_3^{2-} , $\text{HCO}_3^- \cdot \text{H}_2\text{O}$ полимерлардан сатып таркибий чоркомпонент, 76 нүктаки нонварианттый мавчуд аст. Истифодаи усули трансляцияны «сетарафа», «дугарафа» ва «мобайни» нишон медиҳад, ки дар сатып таркибий панчкомпонента ондо нүктакои нонварианттити зеринро ба вучуд меоранд, ки тарзи ҳосилшавиашон дар өздөнгөлдөрдүү 3 ифода гардидаанд.

Чадвали 3. – Траснсятсияны нүктакои нонварианттити чузъй ба сатып умумии полимерлар системасы Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, CO_3^{2-} , $\text{HCO}_3^- \cdot \text{H}_2\text{O}$

Ифодаои геометрии трансляцияшаванды	Нүктакои нонварианттити ҳосилшаванды	Фазаои сатып мувозинаттый	Навъи трансляция
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	$\text{Nk} + \text{Mb} + \text{Gp} + \text{Gl}$	Дугарафа
E_4^4, E_{10}^4	E_3^5	$\text{Nk} + \text{CaH} + \text{Gp} + \text{Gl}$	Дугарафа
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	$\text{Mb} + \text{Nk} + \text{Tr} + \text{CaH}$	Дугарафа
E_2^4, E_{11}^4	E_2^5	$\text{Mb} + \text{Tr} + \text{Na}10 + \text{Gl}$	Дугарафа
E_4^4, E_7^4	E_3^5	$\text{Gb} + \text{Mb} + \text{Nk} + \text{Na}10$	Дугарафа
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	$\text{Gb} + \text{Gl} + \text{Cc} + \text{CaH}$	Дугарафа
$E_6^4, \text{Na}10$	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	$\text{Mb} + \text{Nk} + \text{CaH} + \text{Na}10$	Мобайни
	E_{10}^5	$\text{Na}10 + \text{Gl} + \text{Mb} + \text{Nk}$	Мобайни
	E_{11}^5	$\text{Gl} + \text{Na}10 + \text{CaH} + \text{Mb}$	Мобайни
Изотермаи 50 °C			
E_1^4, E_5^4	E_1^5	$\text{Te} + \text{Nk} + \text{Br} + \text{CaH}$	Дугарафа
$E_2^4, E_{10}^4, E_{13}^4$	E_2^5	$\text{Br} + \text{Na}1 + \text{Tr} + \text{Pr}$	Сетарафа
E_3^4, E_{15}^4	E_3^5	$\text{Nk} + \text{Tr} + \text{Br} + \text{CaH}$	Дугарафа
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	$\text{CaH} + \text{Te} + \text{Gb} + \text{Br}$	Дугарафа
E_{11}^4, E_{14}^4	E_6^5	$\text{Cc} + \text{Gb} + \text{Pr} + \text{CaH}$	Дугарафа
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	$\text{Tr} + \text{Nk} + \text{Br} + \text{CaH}$	Дугарафа
E_8^4, E_{12}^4	E_5^5	$\text{CaH} + \text{Gb} + 5\text{Ca} \cdot \text{Na} \cdot 3 + \text{Br}$	Дугарафа
E_{13}^4, E_{17}^4	E_6^5	$\text{Pr} + \text{CaH} + 5\text{Ca} \cdot \text{Na} \cdot 3 + \text{Cc}$	Дугарафа
$E_3^4, 5\text{Ca} \cdot \text{Na} \cdot 3$	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	$\text{Nk} + \text{Te} + 3\text{Na} \cdot \text{C} + \text{Gb}$	Дугарафа
$E_2^4, E_{10}^4, E_{14}^4$	E_2^5	$\text{Br} + \text{Tr} + \text{Na} \cdot 1 + \text{Pr}$	Сетарафа
E_3^4, E_9^4	E_3^5	$\text{Br} + \text{Te} + \text{Tr} + \text{Gb}$	Дугарафа
E_4^4, E_{17}^4	E_4^5	$3\text{Na} \cdot \text{C} + \text{Te} + \text{Tr} + \text{Pr}$	Дугарафа
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	$\text{CaH} + \text{Nk} + \text{Gb} + 3\text{Na} \cdot \text{C}$	Дугарафа
E_{12}^4, E_{15}^4	E_7^5	$\text{Gb} + \text{Pr} + \text{Cc} + \text{CaH}$	Дугарафа
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	$\text{Te} + 3\text{Na} \cdot \text{C} + \text{Gb} + \text{Pr}$	Мобайни
	E_{11}^5	$\text{Te} + \text{Tr} + \text{Gb} + \text{Pr}$	Мобайни

Диаграммаҳои 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 ҳудуди ҳароратҳои $0 \div 100$ $^\circ\text{C}$, ки дар асоси маълумоти бадастомада дар сатҳи таркиби панҷкомпонентагӣ сохта шудааст, нишон медиҳад, ки майдонҳои кристаллизатсионӣ, ки ҳангоми транслятсияи ҳатҳои моновариантни сатҳи таркиби чоркомпонентагӣ бо фазаҳои саҳти мувозинатӣ сарбаст нестанд, барои сарбаст намудани онҳо, аз навъи транслятсияи «мобайни»-и нуқтаҳои нонвариантни панҷкомпонента бо фазаҳои саҳти мувозинатӣ ёфта шуданд. Варианти ниҳоии диаграммаҳои муттаҳидшудаи комплексҳои 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 сатҳҳои таркиби чор-панҷкомпонентагӣ дар диапазонаи ҳароратҳои $0 \div 100$ $^\circ\text{C}$, бо назардошти ҳамаи намудҳои транслятсия дар расми 7 оварда шудааст.





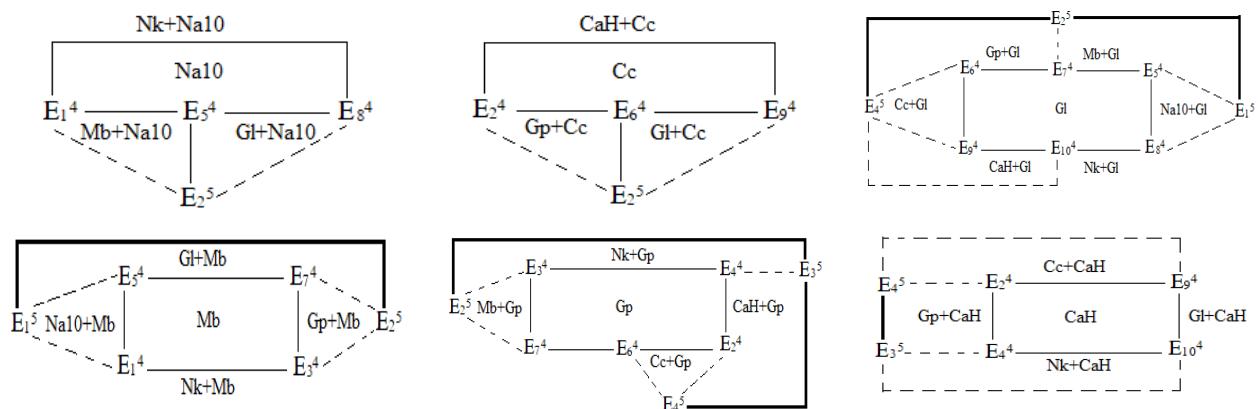
д)

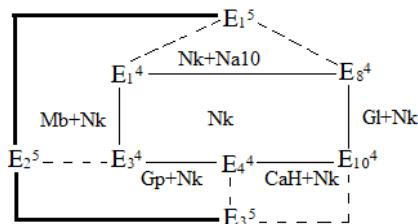
Расми 7. – Политермаи диаграммаи комплекси фазагии сатҳи чор-панҷкомпонентай системаи Na^+ , Ca^{2+} || SO_4^{2-} , CO_3^{2-} , HCO_3^- - H_2O дар диапазонаи ҳароратҳои $0 \div 100$ $^\circ\text{C}$:
а) 0 $^\circ\text{C}$; б) 25 $^\circ\text{C}$; в) 50 $^\circ\text{C}$; г) 75 $^\circ\text{C}$; д) 100 $^\circ\text{C}$

Таҳлили политермайи диаграммаҳои системаи таҳқиқшавандада дар диапазонаи ҳароратҳои $0 \div 100$ $^\circ\text{C}$ нишон медиҳад, ки дар изотермаҳои алоҳидаи комплекси фазагӣ тафйироти фазагӣ ба назар мерасад, ки он вобаста ба қонуниятҳои асосҳои таҳлили физико-химиявӣ ва қоиди фазаҳои Гиббс соҳтори диаграммаҳоро мураккаб менамояд. Мисол, дар диаграммаи изотермии системаи мазкур дар 0 $^\circ\text{C}$ 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 кристаллизатсия ин пайвастагиҳо дар шароити додашуда қисми назарраси системаи таҳқиқшавандаро ишғол мекунанд.

Ҳангоми ҳалли масъалаҳои мушаххаси амалӣ, диаграммаи комплекси фазагии системаи панҷкомпонентай таҳқиқшавандада, ки бо усули транслятсия соҳта шудааст, метавонад аз рӯйи минтақаҳои кристаллизатсияи пайвастагиҳои инфириодӣ дар ҳама сатҳҳои вариантнокии система фрагментатсия карда шавад.

Дар расми 8 фрагментҳои изотермаи 0 $^\circ\text{C}$ -и комплекси фазагии системаи Na^+ , Ca^{2+} || SO_4^{2-} , CO_3^{2-} , HCO_3^- - H_2O дар минтақаи парагенези як фаза бо дигар намакҳо, оварда шудааст.





Расми 8. – Системаи Na^+ , Ca^{2+} || SO_4^{2-} , CO_3^{2-} , HCO_3^- - H_2O дар $0\text{ }^\circ\text{C}$. Фрагментатсияи диаграммаи комплекси фазагӣ худути 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 чудошуда таҳлил ва пешгӯй карда шавад.

Политермаи ҳалшавандагии системаи Na^+ , Ca^{2+} || SO_4^{2-} , CO_3^{2-} , HCO_3^- - H_2O дар саҳти чоркомпонентагии таркиб

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

Ҳалшавандагии компонентҳо дар системаҳои химиявии обӣ. Об ҳалкунандай универсиалий ба шумор меравад. Дар он моддаҳои ҳолати агрегатиашон саҳт, моеъ ва газҳо ҳал мешаванд. Ҳалшавандагии пайвастагиҳои химиявӣ дар се марҳила гузашта, инчунин он аз ҳолати агрегатии моддаҳо вобастагӣ надорад, ки ин марҳилаҳо: аз ҳисоби қувваи кашиши молекулаи об бандҳои химиявии таркиби моддаи ҳалшаванда қанда 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 ҳосиятҳои маҳлулҳо, омехтаҳои механикӣ ва моддаҳои химиявӣ оварда шудааст.

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

Ҳосият	Омехтаи механикӣ	Пайвастҳои химиявӣ	Маҳлулҳо
Таркиб	Тағйирноразир	Тибқи қонуни доимияти таркиб	Тағйирпазир
Таносуби компонентҳо	Таносуби гуногун	Тибқи қонуни эквивалентҳо, нисбатҳои қаратии яклухт	Таносуби васеъ
Банди химиявӣ	Нест	Устувор, энергияи банд $70\text{-}418,7\text{ кЧ/мол}$	Ноустувор, энергияи банд $20,9\text{-}125,6\text{ кЧ/мол}$
Қонуни нигоҳдории массаи модда ва энергия	Итоат менамояд	Итоат менамояд	Итоат менамояд
Ҳосиятҳои қисмҳои таркибӣ	Бо нигоҳ доштани ҳосияти индивидуалӣ	Ҳосияти индивидуалӣ аз байн рафта, ҳосиятҳои нав пайдо мегардад	Ҳосиятҳои индивидуалӣ аз байн рафта, ҳосиятҳои нав пайдо мешавад

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

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

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); $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ – 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.

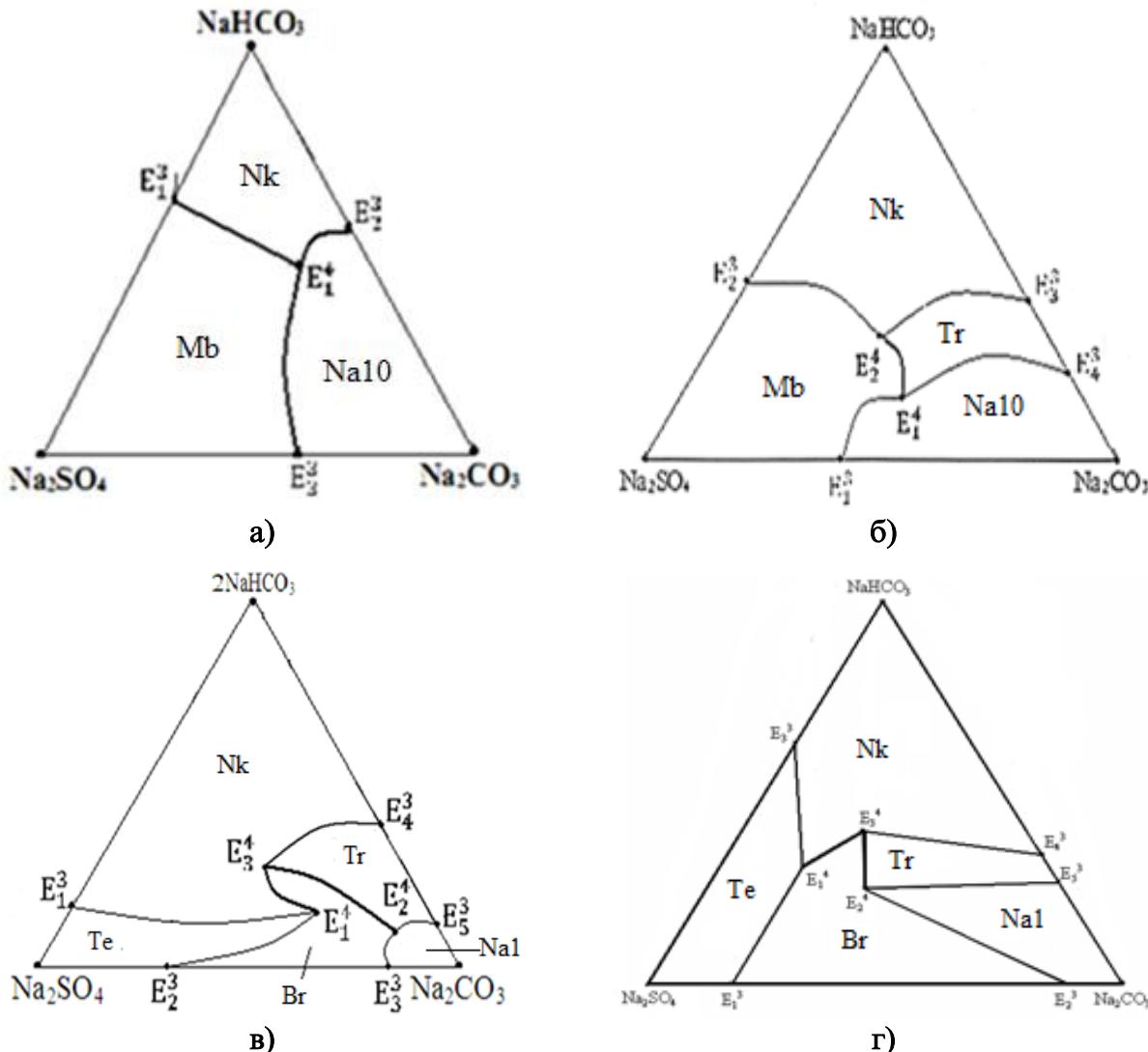
Дар ҷадвали 5 маълумот оид ба ҳалшавии пайвастаҳои инфиридорӣ, инчунин дар нуқтаҳои нонвариантӣ система барои сатҳи таркиби секомпонента, ки аз маълумотномаҳои ҳалшавандагӣ гирифта шудаанд ва барои сатҳи таркиби чоркомпонента, ки аз ҷониби мо ба даст омадаанд, пешниҳод шудаанд.

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

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

Хотимиаи чадвали 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 чадвали 5, аз ҷониби мо изотермаҳои диаграммай 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 диаграммай 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.

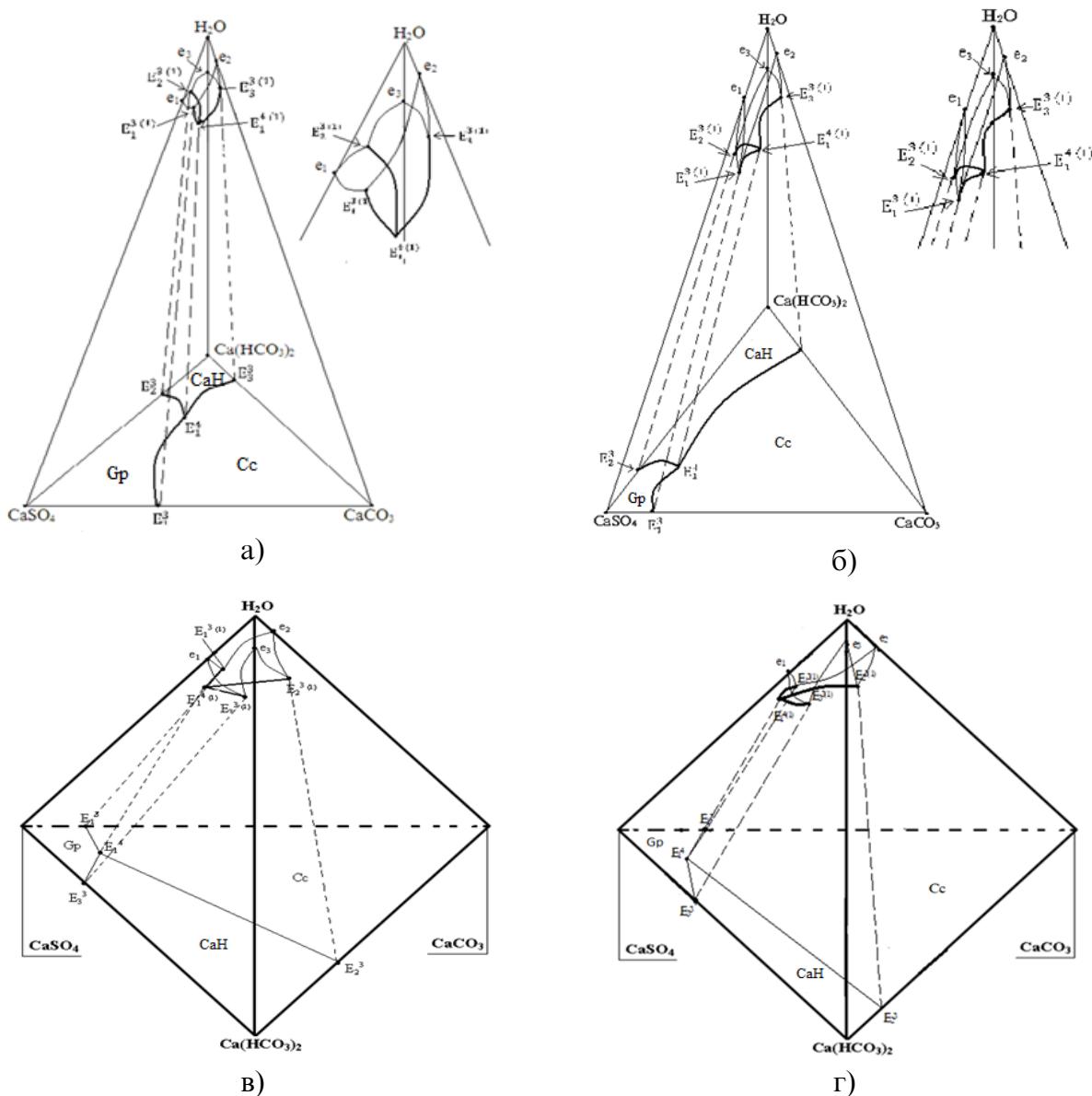
Политермаи ҳалшавандагии системаи $3\text{Ca}^{2+} - \text{SO}_4^{2-} - \text{CO}_3^{2-} - 2\text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$. Қисмҳои таркибии ин системаи чоркомпонента сулфат, карбонат ва гидрокарбонати калсий мебошанд, ки дар ҳароратҳои 0, 25, 50 ва 75 °C дар шакли $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (Gp), 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 чадвали 6 маълумот оид ба ҳалшавии пайвастаҳои инфиродӣ, дар нуқтаҳои сечандай нонвариантни система ҳам дар сатҳи таркиби секомпонента ва дар сатҳи таркиби чоркомпонента, ки аз ҷониби мо ба даст омодаанд, пешниҳод шудаанд.

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

№ 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 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$					
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 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$					
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 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$					
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 $75\text{ }^{\circ}\text{C}$					
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 чадвали 6 аз ҷониби мо диаграммаи ҳалшавии системаи чоркомпонентай $3\text{Ca}^{2+}\text{-}\text{SO}_4^{2-}\text{-}\text{CO}_3^{2-}\text{-}2\text{HCO}_3^-\text{-}\text{H}_2\text{O}$ дар фосилаи ҳарорати $0\text{ - }75\text{ }^{\circ}\text{C}$ соҳта шуд, ки дар расми 10 а) барои изотермаи $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, б) барои изотермаи $25\text{ }^{\circ}\text{C}$, в) барои изотермаи $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ва г) барои изотермаи $75\text{ }^{\circ}\text{C}$ нишон дода шудааст.



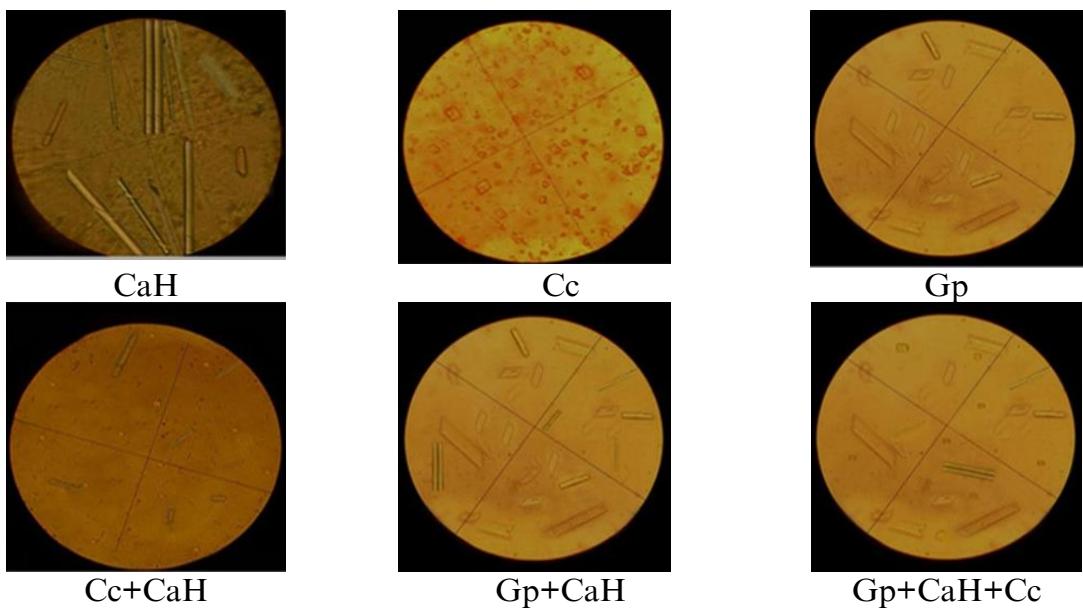
Расми 10. – Диаграммаи ҳалшавандагии $3\text{Ca}^{2+}\text{-}\text{SO}_4^{2-}\text{-}\text{CO}_3^{2-}\text{-}2\text{HCO}_3^-\text{-}\text{H}_2\text{O}$:
а) $0\text{ }^{\circ}\text{C}$; б) $25\text{ }^{\circ}\text{C}$; в) $50\text{ }^{\circ}\text{C}$; г) $75\text{ }^{\circ}\text{C}$

Тибки қоидай Фашанг пахлухои секунца се системаи обии секомпонентаро ифода мекунад, ки онҳо: сулфати калсий-карбонати калсий; сулфати 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; $\text{CaSO}_4\text{-Ca}(\text{HCO}_3)_2\text{-H}_2\text{O}$ дар қисми чапи диаграмма ва $\text{CaCO}_3\text{-Ca}(\text{HCO}_3)_2\text{-H}_2\text{O}$ дар қисми рост аз поён ба боло диаграмма.

Ҳар як компоненти алоҳида бо ҳалкунанда ба оствори координатӣ бо хатти моновариантии концентратсионӣ ифода гардидааст. Координатаҳои дигари шакли геометрий мувофики 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 инфириодӣ ва омехтаи онҳо дар хатҳои моновариантии системаи омӯхташаванда ва нуқтаҳои сечечандай таркиби пурраи система пешниҳод шудаанд.



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

Политермаи ҳалшавӣ дар системаи Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, $\text{CO}_3^{2-}\text{-}\text{H}_2\text{O}$. Фазаҳои саҳти мувозинатии системаи таҳқиқшаванд дар фосилаи ҳароратҳои $0\div100$ $^{\circ}\text{C}$ инҳоянд: $\text{Na}_2\text{SO}_4\cdot10\text{H}_2\text{O}$ - мирабилит (Mb); $\text{CaSO}_4\cdot2\text{H}_2\text{O}$ - гипс (Gp); CaCO_3 - калсит (Cc); $\text{Na}_2\text{CO}_3\cdot\text{CaCO}_3\cdot5\text{H}_2\text{O}$ - гейлюссит (Gl); $\text{Na}_2\text{SO}_4\cdot\text{CaSO}_4$ - глауберит (Gb); Na_2SO_4 - тенардит (Te); $\text{Na}_2\text{CO}_3\cdot\text{CaCO}_3\cdot2\text{H}_2\text{O}$ - пирсонит (Pr); $\text{Na}_2\text{CO}_3\cdot\text{H}_2\text{O}$ - термонатрит (Na1); $5\text{CaSO}_4\cdot\text{Na}_2\text{CO}_3\cdot3\text{H}_2\text{O}$ - $5\text{C}\cdot\text{Na}\cdot3$.

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

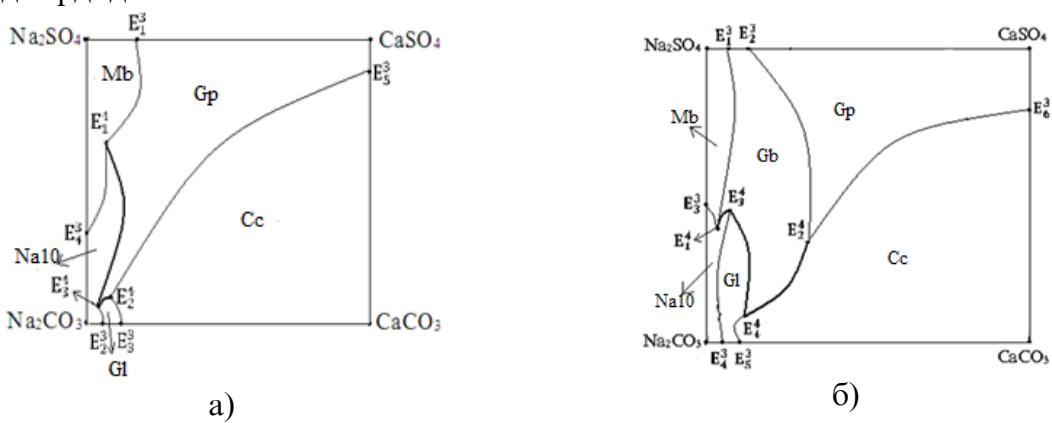
Ҷадвали 7. – Политермаи ҳалшавандагии системаи Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, $\text{CO}_3^{2-}\text{-}\text{H}_2\text{O}$

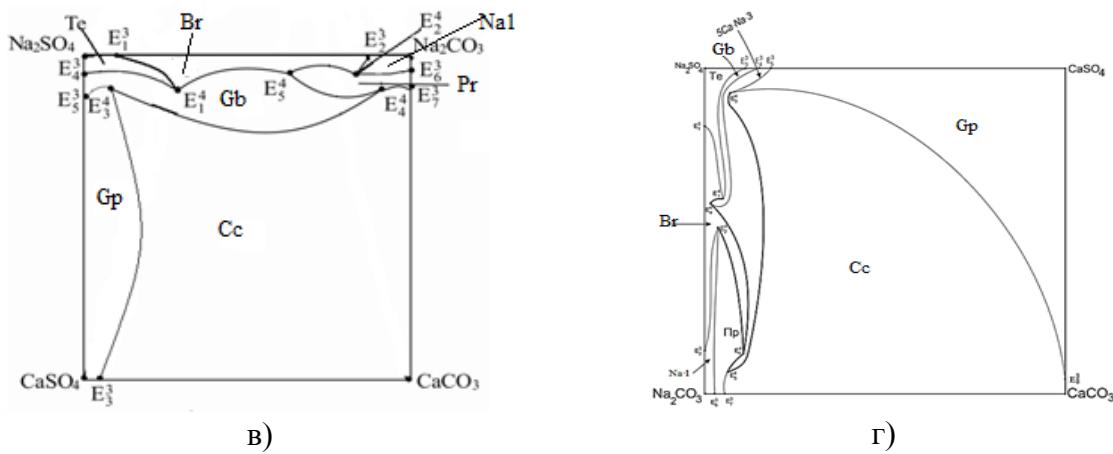
№ нуқта	Таркиби фазаи моеъ, мас.%					Фазаи саҳти мувозинатӣ
	Na_2SO_4	CaSO_4	Na_2CO_3	CaCO_3	H_2O	
1	2	3	4	5	6	7
Изотермаи 0 $^{\circ}\text{C}$						
E ³ ₁	4.340	0.196	-	-	95.460	Mb+Gp
E ³ ₂	-	-	12.00	0.0048	87.990	Na10+Gl
E ³ ₃	-	-	4.300	0.0048	95.690	Gl+Cc
E ³ ₄	2.800	-	6.010	-	91.190	Mb+Na10
E ³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

Хотимиаи чадвали 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

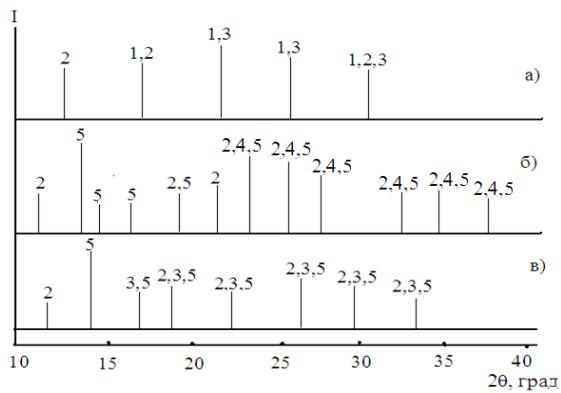
Дар асоси маълумоти дар чадвали 7 овардашуда аз чониби мо диаграммаҳои изотермии ҳалшавии системаи чоркомпонентаи Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, CO_3^{2-} - H_2O сохта шуд. Қисми беобии диаграммаи сохташуда дар шакли чоркунчаи баробартараф дар расми 12 пешниҳод гардидааст.





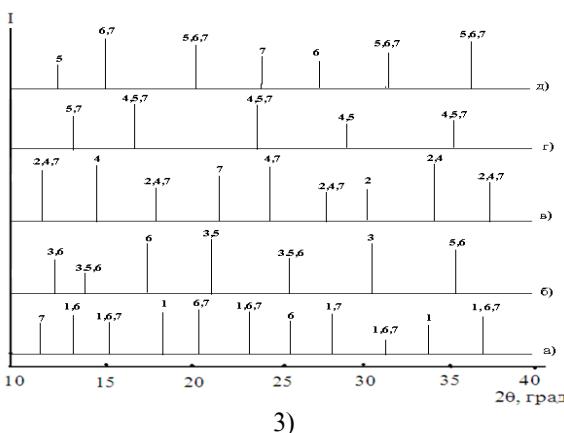
Расми 12. – Проексияи беоби (намакӣ)-и диаграммаи ҳолатии системи $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}, \text{CO}_3^{2-} - \text{H}_2\text{O}$, дар шароити изотермии а) 0 °C; 25 °C; 50 °C; 75 °C

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



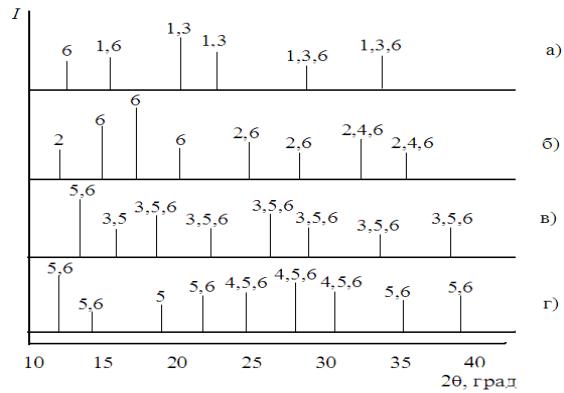
1)

а) $\text{Mb} + \text{Gp} + \text{Na10}$ (нуқтаи E_1^4); б) $\text{Gp} + \text{Gl} + \text{Cc}$ (нуқтаи E_2^4); в) $\text{Gp} + \text{Na10} + \text{Gl}$ (нуқтаи E_3^4);
I – Mb, 2 – Gp, 3 – Na10, 4 – Cc, 5 – Gl



3)

Ҳалшавии системаи $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$. Барои ҳароратҳои 0 ва 25 °C дар системаи таҳқиҷаванда $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ – гидрокарбонати калсий (СаН), 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.»).



2)

а) $\text{Mb} + \text{Gp} + \text{Na10}$ (нуқтаи E_1^4); б) $\text{Gp} + \text{Gb} + \text{Cc}$ (нуқтаи E_2^4); в) $\text{Na10} + \text{Gb} + \text{Gl}$ (нуқтаи E_3^4); г) $\text{Cc} + \text{Gb} + \text{Gl}$ (нуқтаи E_4^4); 1 – Mb, 2 – Gp, 3 – Na10, 4 – Cc, 5 – Gl, 6 – Gb

а) $\text{Te} + \text{Br} + \text{Gb}$ (нуқтаи E_1^4); б) $\text{Br} + \text{Na1} + \text{Pr}$ (нуқтаи E_2^4); в) $\text{Gb} + \text{Gp} + \text{Cc}$ (нуқтаи E_3^4); г) $\text{Pr} + \text{Br} + \text{Gb}$ (нуқтаи E_4^4); д) $\text{Pr} + \text{Br} + \text{Gb}$ (нуқтаи E_5^4). 1 – Te, 2 – Gp, 3 – Na1, 4 – Cc, 5 – Pr, 6 – Br, 7 – Gb

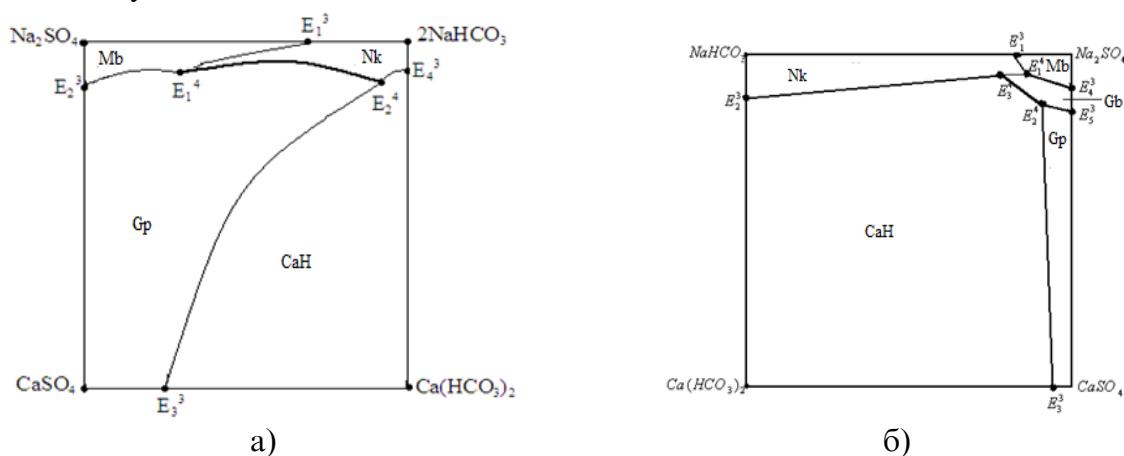
Расми 13. – Штрих рентгенограммаи фазаҳои саҳти мувозинатии системаи $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}, \text{CO}_3^{2-} - \text{H}_2\text{O}$ дар 0 °C: 1. дар 0 °C, 2. дар 25 °C ва 3. дар 50 °C

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

Чадвали 8. – Маълумот оиди ҳалшавандагии системаи Na^+ , Ca^{2+} || SO_4^{2-} , HCO_3^- - H_2O

№ нуқта	Таркиби фазаҳои моеъ, мас. %					Таркиби фазавии таҳшинҳо
	Na_2SO_4	NaHCO_3	CaSO_4	$\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$	H_2O	
Ҳарорати $0\text{ }^\circ\text{C}$						
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 $25\text{ }^\circ\text{C}$						
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 моновариантни ҳатҳо ифода менамояд, ки ҳалшавандагии намакҳои сулфати натрий ва гидрокарбонати натрий дар онҳо нисбатан кам гардидааст. Чунин ҳолат ба илова гардиданни фазаҳои минбаъда алоқаманди дошта, бинобар сабаби камҳалшаванда буданашон ба ҳалшавандагии намакҳои хубҳалшаванда бетаъсир намемонанд. Дар асоси маълумоти чадвали 8 диаграммаи ҳалшавии системаи чоркомпоненти Na^+ , Ca^{2+} || SO_4^{2-} , HCO_3^- - H_2O дар 0 ва $25\text{ }^\circ\text{C}$ соҳта шуд, ки дар расми 14 нишон дода шудааст.



Расми 14. – Проексияи беоби (намакӣ)-и диаграммаи ҳалшавандагии системаи Na^+ , Ca^{2+} || SO_4^{2-} , HCO_3^- - H_2O , дар шароити изотермии а) дар $0\text{ }^\circ\text{C}$ ва б) дар $25\text{ }^\circ\text{C}$

Таҳқиқи ҳалшавандагӣ дар системаи муовизаи Na^+ , Ca^{2+} || 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 өдөрний 9 маълумот оид ба ҳалшавии пайвастагиҳо инфириодӣ, дар нуқтаҳои нонвариантни системаи таҳқиқшавандада дар сатҳи таркиби се-чоркомпонента пешниҳод шудаанд.

Чадвали 9. – Маълумот оиди ҳалшавандагии системаи Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{CO}_3^{2-}$, $\text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$

№ нуқта	Таркиби фазаҳои моеъ, мас.%					Фазаҳои саҳти мувозинатӣ
	Na_2CO_3	NaHCO_3	CaCO_3	$\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$	H_2O	
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

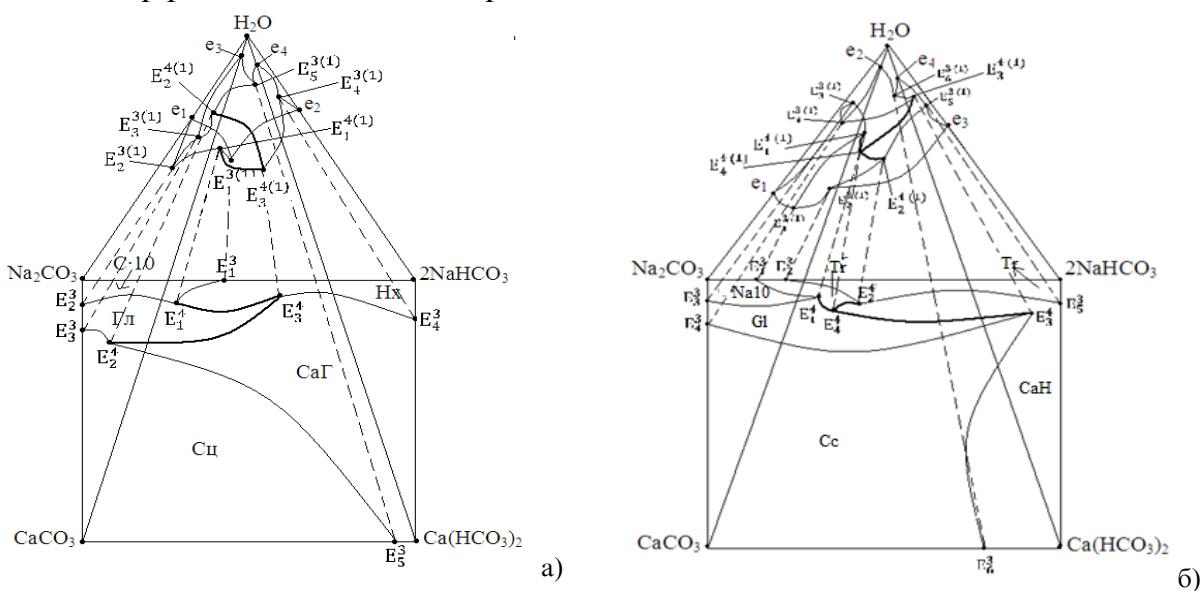
Чи хеле, ки натиҷаҳои ҳалшавандагии системаи Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{CO}_3^{2-}$, $\text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$ чадвали 9 ифода мекунад, баландшавии ҳарорат дар баробари тағиирот ворид намудан ба ҳалшавандагии моддаҳо дар шакли геометрӣ, инчунин ба тағиироти фазагӣ дар системаи мазкур меоварад. Ин боиси мураккаб гардидан соҳтори диаграмма нисбат бар диаграммай системаи мазкур дар 0°C мегардад. Агар ҳалшавандагии қисмҳои таркибии системаи музкуро мӯқоиса намоем таъсири ҳароратро дар он мебинем. Мисол: бо баландшавии 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 тағиир мёбад. Инчунин баландшавии 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 концентратсияи моддаҳо барои качхатҳои моновариантӣ чунин мебошанд: 5.6% - Na_2CO_3 ва 4.61% - NaHCO_3 бо фазаҳои мувозинатии саҳти Na10

+ Nk; 12.0% - Na_2CO_3 ва 0.0048% CaCO_3 бо фазои мувозинатии сахти $\text{Na}10+\text{Gl}$; 4.3% - Na_2CO_3 ва 0.0046% - CaCO_3 бо фазаҳои мувозинатии сахти $\text{Gl}+\text{Cc}$; 4.89% - NaHCO_3 ва 0.109% - $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ бо фазаҳои мувозинатии сахти $\text{Nk}+\text{CaH}$ ва 0.0014% - CaCO_3 ва 0.083% - $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ бо фазаҳои мувозинатии сахти $\text{Cc}+\text{CaH}$.

Барои изотермаи 25 °C концентратсияи моддаҳо дар фазаи моёй чунин мебошад: 22.46% - Na_2CO_3 ва 2.84% - NaHCO_3 бо фазаҳои мувозинатии сахти $\text{Na}10+\text{Tr}$; 17.62% - Na_2CO_3 ва 4.62 - NaHCO_3 бо фазаҳои мувозинатии сахти $\text{Tr}+\text{Nk}$; 5.65% - Na_2CO_3 0.0035% - CaCO_3 бо фазаҳои мувозинатии сахти $\text{Na}10+\text{Gl}$; 4.5% - Na_2CO_3 ва 0.0024% - CaCO_3 бо фазаҳои сувозинатии сахти $\text{Gl}+\text{Cc}$; 5.43% - NaHCO_3 ва 0.0181% $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ бо фазаҳои мувозинатии сахти $\text{Nk}+\text{CaH}$; 0.0046% - CaCO_3 ва 0.0179% - $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ бо фазаҳои мувозинатии сахти $\text{Cc}+\text{CaH}$. Таъсири ҳарорат на ин ки ба ҳалшавандагӣ, балки ба ҳосилшавии фазаи нави мувозинатӣ меоварад. Дар ин система тағиирот дар ҳосилшавии фазаҳои сахти мувозинатии нуқтаҳо ва концентратсияи қисмҳои таркибии онҳо ба назар мерасанд.

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



Расми 15. – Диағраммаи 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 концентратсионии фазаҳои сахти мувозинатӣ дар системаи Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, CO_3^{2-} , HCO_3^- - H_2O асоси коркарди партовҳои моёни истеҳсоли алюминий, ҳамчун асоси фундаменталий

Системаи бисёркомпонентаи Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, CO_3^{2-} , HCO_3^- - H_2O ва мувозинати нонвариантӣ он. Мувофиқи назарияи таҳлили физико-химиявӣ, новобаста аз варианҷҳои ташаккули нуқтаи нонвариантӣ, концентратсияи мувозинатии фазаи моёй барои он бояд доимӣ бошад. Аммо, мувофиқи маълумотҳои қаблӣ дар бисёр ҳолатҳо барои як ва якхела таркиби фазавии таҳшинҳои нуқтаҳои нонвариантӣ 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-} - H_2O дар 0 °C барои яке аз нуқтаҳои нонвариантӣ ду таркиби гуногуни фазаи моёни 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

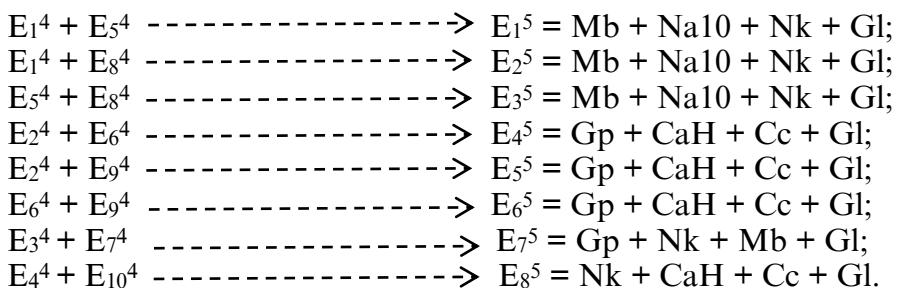
Намуна	Таркиби маҳлули сер, мас. %							Таркиби фазаи сахт
	Na_2SO_4	NaHCO_3	CaSO_4	Na_2CO_3	CaCO_3	$\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$	H_2O	
ТПМ	5.2800	4.5100	-	5.7800	0.0054	-	84.4246	$\text{Nk}+\text{Mb}+\text{Na}10+\text{Gl}$
Эксп.	5.3700	4.6900	-	5.7600	0.0061	-	84.1739	$\text{Nk}+\text{Mb}+\text{Na}10+\text{Gl}$

Тавре ки аз чадвали 10 диди мешавад, барои як ва якхела таркиби фазаҳои саҳти мувозинатӣ фазаи моеъи мувозинатӣ бо микдори гуногуни намакҳои даҳлдор хос аст. Аз ин рӯ, метавон хулоса кард, ки чор фазаи саҳти мувозинатии зикршуда, ки ба ин нуқтаи нонвариантӣ мувофиқат мекунанд, метавонанд якҷоя на дар концентратсияи муайян (доимӣ)-и фазаи моеъи мувозинатӣ барои онҳо, балки дар як интервали муайянни концентратсияи намакҳои дар он мавҷудбуда кристаллизатсия шаванд.

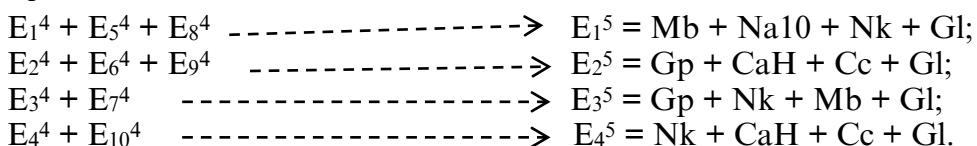
Таҷрибаи татбиқи усули транслятсия барои пешгӯй ва соҳтани диаграммаҳои мувозинатҳои фазавии системаҳои бисёркомпонента (панҷ ва шашкомпонента) ба варианҷҳои гуногуни ташаккули шаклҳои геометрии онҳо ишора мекунад. Бо истифода аз усули ҳалшавандагӣ барои системаи панҷкомпонентаи Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, CO_3^{2-} , $\text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$ дар 0°C 4 нуқтаи нонвариантӣ бо фазаҳои саҳти мувозинатӣ муайян карда шуданд: $E_1^5 = \text{Mb} + \text{Na}10 + \text{Nk} + \text{Gl}$; $E_2^5 = \text{Gp} + \text{CaH} + \text{Cc} + \text{Gl}$; $E_3^5 = \text{Gp} + \text{Nk} + \text{Mb} + \text{Gl}$; $E_4^5 = \text{Nk} + \text{CaH} + \text{Cc} + \text{Gl}$. Барои нуқтаи нонвариантии 1 аз рӯи таҷриба ду таркиби маҳлули сершуда пайдо шудааст, дар ҳоле ки барои ду нуқтаи дигар якторӣ таркиб муайян гардидааст.

Маълумоте, ки бо усули транслятсия ба даст омадаанд, мавҷудияти чаҳор нуқтаи нонвариантро барои ин система тасдиқ мекунанд ва ҳамзамон мавҷудияти таркиби гуногуни маҳлули сершударо барои як ва якхела нуқтаи нонвариантӣ шарҳ медиҳанд. Ин далелро бо таҳлили роҳҳои ташаккули нуқтаҳои нонвариантии системаи Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, CO_3^{2-} , $\text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$ дар 0°C метавон тасдиқ кард.

Транслятсияи нуқтаҳои нонвариантии чоркомпонента ба сатҳи таркиби панҷкомпонента дар шакли ҳатҳои моновариантӣ ва буриши мутақобилаи онҳо, бо риояи қоиди 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 маъни онро дорад, ки онҳо дар натиҷаи буриши сетарафаи ҳатҳои моновариантӣ, ки ҳангоми транслятсияи нуқтаҳои нонвариантии чоргона ба вучуд омадаанд, ташаккул мейбанд. Аз ин рӯ, барои системаи панҷкомпонентаи Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, CO_3^{2-} , $\text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$ дар 0°C на ҳашт, балки 4 нуқтаи нонвариантии панҷгона хос аст, ки ба таври зайл ташаккул ёфтаанд:



Бо назардошти гуфтаҳои боло, метавон пешгӯй кард, ки таркиби гуногуни маҳлули сершудаи нуқтаи нонвариантии системаи бисёркомпонента бо як ва якхела таркиби фазаҳои саҳти мувозинатӣ (чадвали 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-} , $\text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$ дар 0°C -ро ба таври графикӣ чунин ифода кардан мумкин аст (расми 16).



Расми 16. – Тарҳи вариантҳои ҳосилшавии нуқтаҳои нонвариантӣ системаи Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, CO_3^{2-} , HCO_3^- - H_2O дар $0\text{ }^\circ\text{C}$ зимни тарнслятсияи нуқтаҳои чорчандা ба сатҳи таркиби панҷкомпонентагӣ бо таҳшинҳои: а) Mb+Na10+Nk+Gl; б) Gp+CaH+Cc+Gl

Дар расми 16 каҷхатҳои қашидашуда бо тирчаҳо буриши дутарафаро ва ҳатҳои пунктирий бо тирчаҳо буриши сетарафай каҷхатҳои моновариантро ҳангоми ташаккули нуқтаҳои нонвариантӣ E_1^5 ва E_2^5 нишон медиҳанд. Аз гуфтаҳои боло метавон пешгӯй кард, ки мо бо ҳолате сарукор дорем, ки дар диаграммаи системаҳои бисёркомпонента мувозинатҳои нонвариантӣ на танҳо дар шакли нуқтаҳои беандоза, балки инчунин дар шакли ифодаҳои геометрии (нонвариантӣ) дорои андозаи муайян инъикос ёфта метавонанд. Андозаи ин шаклҳо бо таркибҳои гуногуни фазаи моеъи мувозинатӣ, ки барои як ва якхела таркиби фазаҳои саҳти мувозинатӣ ҳосанд, муайян карда мешавад.

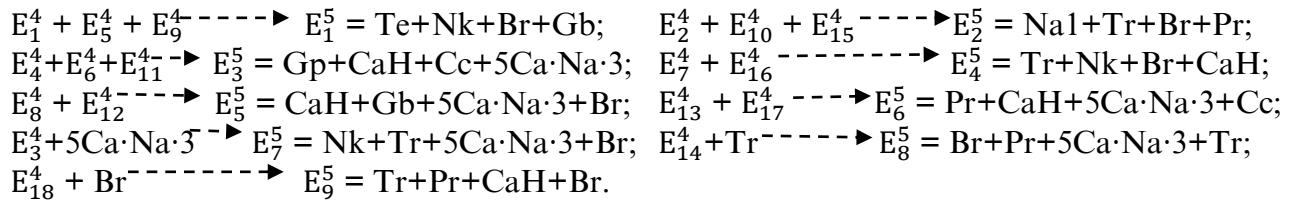
Тағиیرёбии таркиби фазаи моеъи мувозинатӣ метавонад ба роҳҳои гуногуни (вариантҳои) ташаккули ин шакли геометрии нуқтаи нонвариантӣ алоқаманд бошад. Чунин фарзия на танҳо бо мисоли баррасишудаи ҳалшавандагии системаи панҷкомпонентаи Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, CO_3^{2-} , HCO_3^- - H_2O дар $0\text{ }^\circ\text{C}$, балки бо таҳқиқи дигар системаҳои бисёркомпонента низ тасдиқ меёбад. Таркиби гуногуни химиявии маҳлули сершуда дар системаи Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, CO_3^{2-} , HCO_3^- - H_2O дар $0\text{ }^\circ\text{C}$ ҷадвали 10 барои як ва якхела таркиби фазаҳои саҳти нуқтаҳои нонвариантро, бешубҳа, бо тартиби пайдарпайи илова кардани намакҳои муайян ба омехтаи ибтидой шарҳ додан мумкин аст, ки ин бо вариантҳои гуногуни транслятсияи нуқтаҳои нонвариантӣ чоргонга ба сатҳи таркиби панҷкомпонента мувофиқат мекунад.

Имконияти принсиалии мувофиқати як ва якхела таркиби фазаҳои саҳти нуқтаҳои нонвариантӣ ба фазаҳои моеъи мувозинатӣ, ки аз рӯйи таркиби химиявӣ гуногунанд, дар ҳолати бисёркомпонента будани системаи таҳқиқшавандана нишон дода шуд. Ин метавонад бо гуногуни роҳҳои расидан ба мувозинати нонвариантӣ асоснок карда шавад. Аз ин рӯ, мувозинати нонвариантӣ дар диаграммаи системаи бисёркомпонентаи Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, CO_3^{2-} , HCO_3^- - H_2O 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 моновариантӣ дар системаи бисёркомпонентаи Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, CO_3^{2-} , HCO_3^- - H_2O . Доистани қонуниятҳои мувозинатҳои фазавӣ ва соҳтори комплексҳои фазавии системаҳои бисёркомпонента на танҳо аз ҷиҳати илмӣ, балки барои фароҳам овардани шароити беҳтарин ҷиҳати барои коркарди ашёи хоми табиии полиминералӣ ва мураккаби техникӣ (партовҳои истехсолӣ) ниҳоят зарур аст. Муайян кардани ин қонуниятҳо дар таҷриба бо мушкилоти зиёде болои ҳам мебошад, ки мухимтарини онҳо инҳоянд: набудани шаклҳои геометрии бисёрченакаи воқеӣ барои нишон додани қонуниятҳои ошкоршуда; набудани усуљҳои боэътиими миайянкунии фазаҳои саҳти мувозинатӣ аз сабаби гуногуни онҳо; ҳарочоти зиёди моддӣ ва вақт ҳангоми гузаронидани таҷрибаҳо. Барои ҳалли ин мушкилот як қатор усуљҳо таҳия шудаанд, аммо истифодай онҳо маҳдуд аст. Аз ҷумла, таҳқиқи системаи бисёркомпонента бо усули кам кардани энергияи Гиббс ба ақидаи худи муаллифон,

барои системаҳое, ки на бештар аз чор компонент доранд, натиҷаҳои қаноатбахш 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 соҳтан ғайриимкон аст.

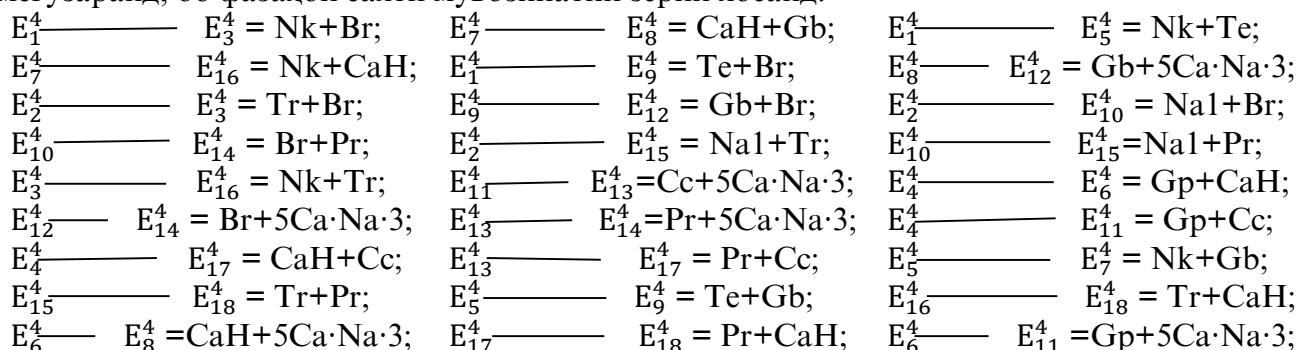
Таҷрибаи тадбики усули транслятсия барои таҳқиқи қисмҳои системаи панҷкомпонентаи Na^+ , Ca^{2+} || SO_4^{2-} , CO_3^{2-} , HCO_3^- - H_2O ба хусусияти гуногуни ташаккули шаклҳои геометрӣ, баҳусус ҳатҳои моновариантии системаҳои таҳқиқшуда ишора мекунад. Дар зер ифодай математикии вариантҳои гуногуни бурида шудани ҳатҳои моновариантӣ, ки ҳангоми трансформатсияи нуқтаҳои чоргона (чадвали 3) ба вучуд омадаанд, ки дар он яке аз фазаҳои саҳти мувозинатӣ тафовуд дорад, оварда шудааст:



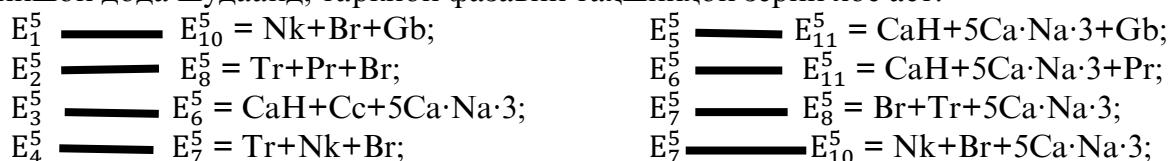
Тавре ки аз расми 7 (г) дида мешавад, байни нуқтаҳои нонвариантӣ ҳатҳои гуногуншакл мегузаранд: байни нуқтаҳои нонвариантии чоркомпонента - дар шакли ҳатҳои борики яклухт; байни нуқтаҳои нонвариантии чоркомпонента ба панҷкомпонента - дар шакли ҳатҳои пунктирий бо тирчаҳо; байни нуқтаҳои нонвариантии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

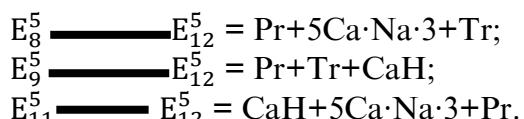
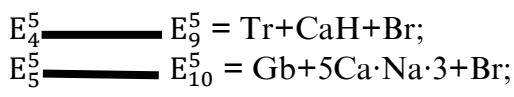
Ҳатҳое, ки байни нуқтаҳои нонвариантии чоргона мегузаранд, ҳатҳои моновариантии сатҳи таркиби чоркомпонентаи системаи таҳқиқшаванда мебошанд. Ҳатҳои пунктирий, ки байни нуқтаҳои нонвариантии чоркомпонента ва панҷкомпонента мегузаранд, ҳатҳои моновариантии сатҳи таркиби панҷкомпонентагиро ифода мекунанд.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

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

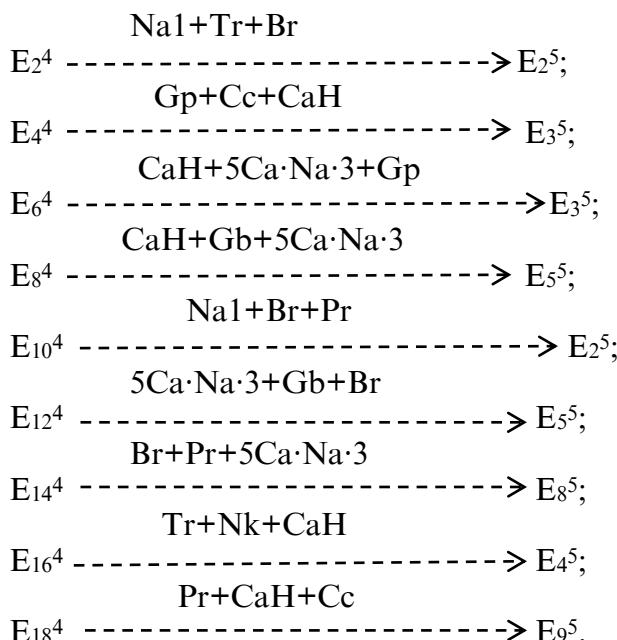
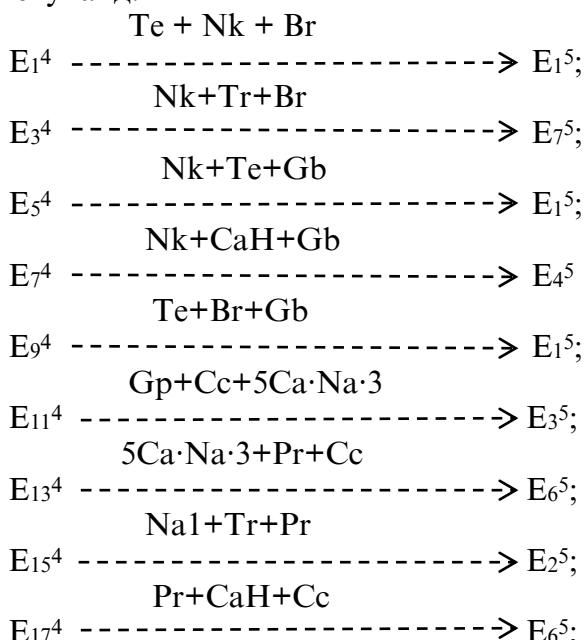


Барои ҳатҳои моновариантии сатҳи таркиби панҷкомпонента, ки байни нуқтаҳои нонвариантии панҷгона мегузаранд ва дар расми 7 (г) дар шакли ҳатҳои ғафси яклухт нишон дода шудаанд, таркиби фазавии таҳшинҳои зерин хос аст:



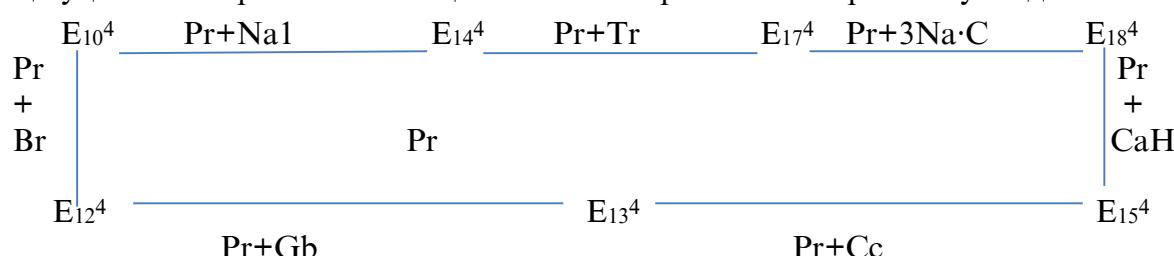


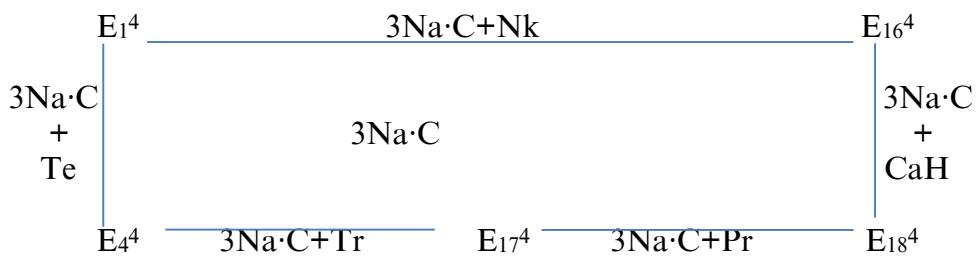
Ташаккули намуди дигари хатҳои моновариантӣ бо трансформатсияи нуқтаҳои нонвариантӣ сатҳи таркиби панҷкомпонента (табдил ёфтани онҳо ба хатҳои моновариантӣ) ҳангоми транслятысия алоқаманд аст. Ин хатҳо дар сатҳи таркиби панҷкомпонента ҳангоми илова карданӣ компоненти панҷум ба системаҳои чоркомпонентай ибтидоии таркибёбанда ба вучӯд меоянд. Дар системаи мазкур мӯайян намудем, ки нуқтаҳои нонвариантӣ чоргона, ки дар таркиби худ мавҷуданд, ҳангоми транслятысия ба сатҳи таркиби панҷкомпонента, ба хатҳои моновариантӣ табдил ёфта, дар ташаккули нуқтаҳои нонвариантӣ панҷгонаи зерин иштирок мекунанд:



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

Мувозинатҳои дивариантӣ дар системаи бисёркомпонентай Na^+ , Ca^{2+} || SO_4^{2-} , CO_3^{2-} , HCO_3^- - H_2O . Табиист, ки ҳар қадар нуқтаҳои нонвариантӣ ва хатҳои моновариантӣ бештар дар маҳдудсозии майдонҳои дивариантӣ иштирок кунанд, ҳамон қадар қисмҳои зиёди системаи мавриди таҳқиқро ин майдонҳо ишғол мекунанд. Масалан, дар маҳдудсозии майдони дивариантӣ бо фазаҳои саҳти мувозинатии Pr (расми 7 (д)) 7 нуқтаи нонвариантӣ ва 7 хатти моновариантӣ иштирок мекунанд, дар ҳоле ки дар маҳдудсозии майдони дивариантӣ бо фазаҳои саҳти мувозинатии $3Na \cdot C$ панҷ нуқтаи нонвариантӣ ва панҷ хатти моновариантӣ иштирок мекунанд:



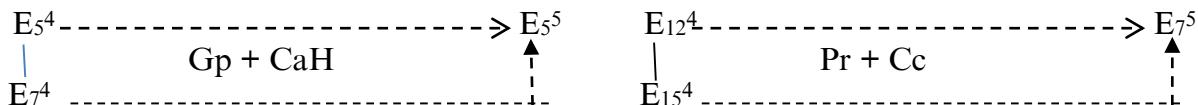


Ин далел, нишон медиҳад, ки майдони дивариантii аввал дар шароити зикршуда қисми зиёди системаро ишғол мекунад назар ба майдони дивариантii дуюм.

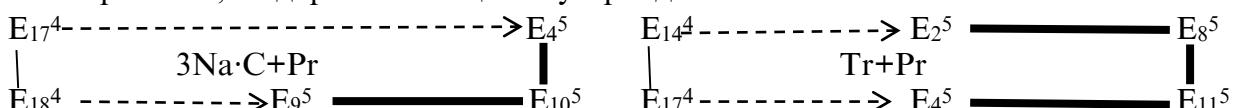
Хангоми гузаштани система аз сатҳи чоркомпонента ба сатҳи панҷкомпонента (масалан, бо илова кардани компоненти панҷум ба яке аз панҷ системаи чоркомпонента), табдилёбии шаклҳои геометрии системаҳои чоркомпонента бо транслятсияи минбаъдаи онҳо ба сатҳи таркиби панҷкомпонента ба амал меояд. Баъдан, шаклҳои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

Мувофиқи вазифаи гузашташуда, мо мисолҳои ташаккули майдонҳои дивариантӣ ва имкониятҳои муайянкунни роҳи кристаллизатсияи фазаҳои саҳтро аз рӯйи соҳтори онҳо дида мебароем. Ташаккули майдонҳои дивариантӣ дар сатҳи таркиби панҷкомпонента бо ду роҳ амалӣ мегардад. Роҳи аввал ба транслятсияи хатҳои моновариантii сатҳи таркиби чоркомпонента ба сатҳи таркиби панҷкомпонента алоқаманд аст. Роҳи дуюм бо маҳдудсозии сатҳи система бо нуқтаҳои нонвариантii панҷгона ва хатҳои моновариантie, ки дар байни онҳо мегузаранд, алоқаманд аст. Майдонҳои дивариантӣ, ки дар натиҷаи транслятсияи хатҳои моновариантii сатҳи таркиби чоркомпонента ба сатҳи таркиби панҷкомпонента ба вучуд омадаанд, метавонанд бо инҳо маҳдуд шаванд (расми 7, д):

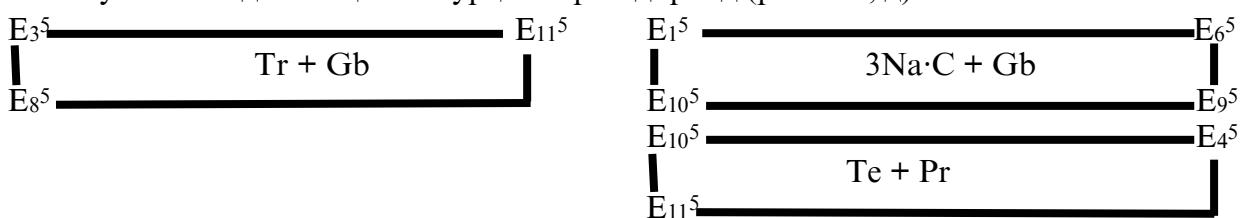
а) Нуқтаҳои нонвариантii панҷгона - хатҳои моновариантie, ки дар байни онҳо мегузаранд ва дар натиҷаи транслятсияи нуқтаҳои нонвариантii чоргона ба вучуд омадаанд - нуқтаҳои нонвариантii панҷгона. Мисол:



б) Нуқтаҳои нонвариантii панҷгона – хатҳои моновариантie, ки дар байни онҳо мегузаранд – хатҳои моновариантie, ки дар натиҷаи транслятсияи нуқтаҳои нонвариантii чоргона ба вучуд омадаанд – нуқтаҳои нонвариантii панҷгона – хатҳои моновариантie, ки дар байни онҳо мегузаранд. Масалан:

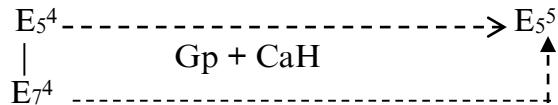


Таҳлили соҳтори диаграммаи комплекси фазавии системаи Na^+ , $\text{Ca}^{2+}\|\text{SO}_4^{2-}$, CO_3^{2-} , $\text{HCO}_3^- \text{-H}_2\text{O}$ дар $100\ ^\circ\text{C}$ нишон медиҳад, ки бо роҳи дуюм се (3) майдони дивариантӣ ташаккул меёбанд ва онҳо контурҳои зерин доранд (расми 7, д):



Принципҳои ташаккули шаклҳои геометрӣ, баҳусус майдонҳои дивариантӣ, на танҳо барои фаҳмидани қонуниятҳое, ки соҳтори диаграммаи системаҳои физико-химиявии бисёркомпонентаро муайян мекунанд, аҳамияти илмӣ-назариявӣ доранд, балки барои ҳалли масъалаҳои амалий, маҳсусан ҳангоми муайян кардани роҳҳои имконпазири кристаллизатсияи фазаҳои саҳт, 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 ҷойгир бошад

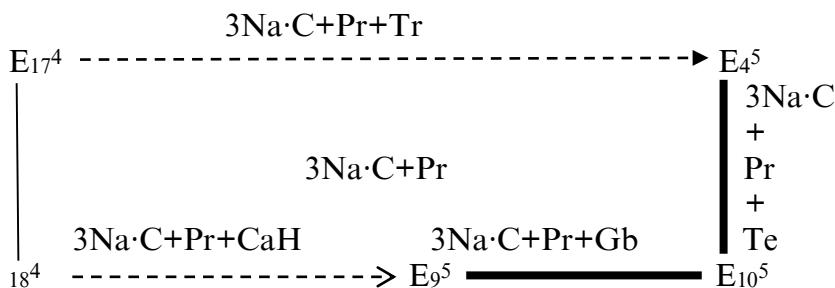


он ду имконият аз рӯйи шумораи хатҳои моновариантии сатҳи таркиби панҷкомпонента, ки ин майдонро маҳдуд мекунанд барои идомаи роҳи кристаллизатсия вуҷуд дорад:

- дар самти хатти моновариантии $\text{E}_5^4\text{--E}_5^5$, ки пас аз расидан ба он Gb (глауберит) ҳамчун фазаи ҷоруми саҳти мувозинатӣ кристаллизатсия мешавад;
- дар самти хатти моновариантии $\text{E}_7^4\text{--E}_5^5$, ки пас аз расидан ба он Cc (калсит) ҳамчун фазаи ҷоруми саҳти мувозинатӣ кристаллизатсия мешавад.

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

Ҳангоми ҷойгиршавии нуқтаи фигуративии таркиби омехта дар майдони дивариантӣ



имкониятҳои роҳҳои кристаллизатсияи фазаи ҷоруми саҳти мувозинатӣ сето мешаванд аз рӯйи шумораи хатҳои моновариантии сатҳи таркиби панҷкомпонента. Сипас, роҳи кристаллизатсия дар яке аз се нуқтаи нонвариантии панҷгона ба итмом мерасад.

Масалан, ҳангоми расидан ба хатти моновариантии $\text{E}_{17^4}\text{E}_{4^5}$ дар роҳи кристаллизатсия, фазаи сеюми саҳти мувозинатӣ Tr (трона) ҳоҳад буд ва кристаллизатсия дар нуқтаи нонвариантии E_{4^5} бо фазаҳои саҳти мувозинатии $3\text{Na}\cdot\text{C+Pr+Tr}$ ба итмом мерасад. Ҳангоми расидан ба хатти моновариантии $\text{E}_{18^4}\text{E}_{9^5}$ дар роҳи кристаллизатсия, фазаи сеюми саҳти мувозинатӣ CaH – гидрокарбонати калсий ҳоҳад буд ва кристаллизатсия дар нуқтаи нонвариантии E_{9^5} бо фазаҳои саҳти мувозинатии $3\text{Na}\cdot\text{C+Pr+CaH}$ ба итмом мерасад.

Ҳангоми расидан ба хатҳои моновариантии $\text{E}_{9^5}\text{E}_{10^5}$ ё $\text{E}_{4^5}\text{E}_{10^5}$ дар роҳи кристаллизатсия, ҳаракати минбаъдаи он аз раванди сершавии маҳлули фазаи ҷоруми саҳти мувозинатӣ вобаста аст. Масалан, агар ҳангоми расидан ба хатти моновариантии $\text{E}_{9^5}\text{E}_{10^5}$ раванди сершавии маҳлул бо афзоиши концентратсияи маҳлул аз ҳисоби трона (Tr) ҳамроҳӣ шавад, пас роҳи кристаллизатсия ба самти нуқтаи нонвариантии панҷгонаи E_{9^5} равона карда мешавад, ки пас аз расидан ба он фазаҳои саҳти мувозинатӣ $3\text{Na}\cdot\text{C+Pr+CaH+Gb}$ ҳоҳанд буд. Агар пас аз расидан ба хатти моновариантии $\text{E}_{4^5}\text{E}_{10^5}$ раванди сершавии маҳлул бо афзоиши концентратсияи маҳлул аз ҳисоби тенардит (Te) ҳамроҳӣ шавад, пас роҳи кристаллизатсия ба самти нуқтаи нонвариантии шашгонай E_{10^5} равона карда мешавад, ки пас аз расидан ба он фазаҳои саҳти мувозинатӣ $3\text{Na}\cdot\text{C+Pr+Te+Gb}$ ҳоҳанд буд.

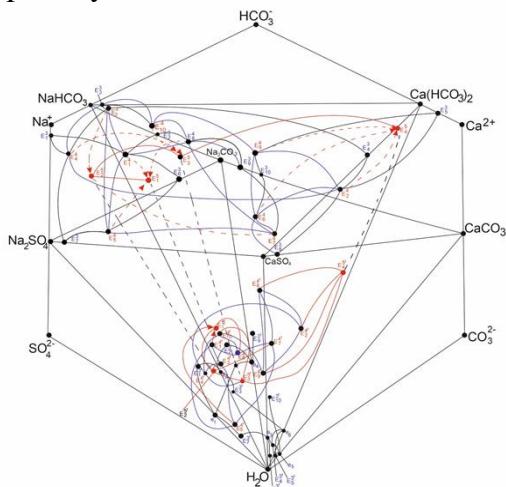
Ҳалшавандагии системаи мувозизаи панҷкомпонентай Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, CO_3^{2-} , HCO_3^- - H_2O дар ҳарорати 0°C . Дар ҳарорати 0°C дар системаи Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, CO_3^{2-} , HCO_3^- - H_2O фазаҳои саҳти мувозинатии $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ - 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 инфириодӣ, дар нуқтаҳои нонвариантии системаи

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

Ҷадвали 11 – Ҳалшавандагии нуктаҳои системаи Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, CO_3^{2-} , $\text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$ дар ҳарорати 0°C

№ нуқта	Таркиби фазаи моеъ, мас.%							Таркиби фазавии 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 ҷадвали 11 мо диаграммаи ҳалшавандагии системаи чоркомпонентии Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, CO_3^{2-} , $\text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$ -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-} , $\text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$ 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 тааллук 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 ишқории гарми гардиши ҳал карда шудаанд, ба даст оварда мешавад. Пас аз чудо кардани боқимондаи ҳалнашаванда, онро бо таносуби м/с 0,61:0,76 дар давоми 40-100 дақиқа ва дар ҳарорати 0-50 °C коркард мекунанд. Илова бар ин, маҳлули ишқорӣ, ки аз коркарди боқимонда пас аз ғафшавӣ ва тозакунӣ ба даст меояд, барои ҳал кардани маҳлулҳои модарӣ баргардонида мешавад.

Аз диаграммаи ҳолати системаи Na^+ , Ca^{2+} || CO_3^{2-} , HCO_3^- - H_2O дида мешавад, ки дар 0 °C (расми 15 (а)) декагидрати карбонати натрий бо фазаҳои гейлюсит ва нахколит ҳамсарҳад аст ва қобилияти ҳамнишастагӣ дар нуқтаҳои нонвариантӣ сатҳи секомпонентӣ дорад. Аммо, дар ҳарорати 25 °C мувозинати фазавии декагидрати карбонати натрий тағиیر меёбад ва бо баланд шудани ҳарорат аз 0 то 50 °C пайдоиши фазаи нави трона мушоҳида мешавад, ки соҳтори диаграммаи системаи дар боло зикршударо тағиир 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^+ , Ca^{2+} || CO_3^{2-} , HCO_3^- - H_2O дар 50 °C нишон дода шудааст, ки тағиیرёбии маълумоти бадастомада нисбат ба изотермаҳои 0 ва 25 °C дида мешавад. Аз ҷумла, зиёд шудани ҳалшавандагии декагидрати карбонати натрий аз 6,570 ва 22,95% мас. дар 0 ва 25 °C мутаносибан то 32,10% дар 50 °C.

Муқоиса кардани тағиироти ҳалшавии намакҳо дар нуқтаҳои нонвариантӣ, ки дар он ҷо се фазаи саҳт дар ҳолати мувозинат қарор доранд, имконнопазир аст, зоро бо баланд шудани ҳарорат таркиби фазавии таҳшинҳо тағиир меёбад. Аз ҷумла, дар 50 °C 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, зоро ҳалшавии $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ дар 50 °C 32,1 г, дар 25 °C 22,95 г-ро ташкил медиҳад ва дар 0 °C 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 °C дар тӯли 40 дақиқа бо маҳлулҳои ишқории бо усули маълум коркардшуда, коркард карда мешавад. Маҳлул ғафс карда шуда, маҳлули ишқории сер аз боқимонда тоза карда мешавад. Боқимондаи гарм ба микдори 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 °C 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. Истиҳроҷи 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 ишқории 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 истеҳсолот баргардонида мешавад. Истиҳроҷи 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 ишқории 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 истеҳсолот баргардонида мешавад. Истиҳроҷи 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, зоро амалиёти хунукунни боқимондаи ҳалнашаванда бо маҳлули ишқории партов ва амалиёти шустани нахколит аз таркиби чоркомпонентӣ аз нақша хориҷ карда шудааст. Афзоиши миқдори декагидрати карбонати натрий аз ҳисоби истиҳроҷи 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 пайвастҳои натрий, аз ҷумла барои ба даст овардани нахколит (NaHCO_3) аз партовҳои моеъи истеҳсоли алюминий тааллук дорад. Мақсади ин ихтироъ ба даст овардани нахколит аз партовҳои моеъи истеҳсоли алюминий мебошад, ки таркибашон аз сулфатҳо, карбонатҳо ва гидрокарбонатҳои натрий иборат аст.

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

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

Дар натица, нахколит бо фазаҳои мирабилит ва трона ҳамсарҳад мегардад, ки онҳо имкон доранд дар нуқтаҳои сатҳи секомпонентӣ якҷоя таҳшин шаванд. Ҳалшавандӣ дар шаклҳои геометрикии системаи Na_2SO_4 – Na_2CO_3 – NaHCO_3 – H_2O дар 50 °C нишон дода шудааст. Тағйирёбии маълумоти бадастомада нисбат ба изотермаҳои 0 ва 25 °C дида мешавад. Бо баланд шудани ҳарорат аз 0 то 25 °C ҳалшавии нахколит мутаносибан аз 6,49 то 9,31 % мас. меафзояд, дар ҳоле ки бо баланд шудани ҳарорат то 50 °C ин нишондиҳанда то 12,70 % меафзояд.

Муқоисаи тағйирёбии ҳалшавии намакҳо дар нуқтаҳои нонвариантӣ, ки дар онҳо се фазаи саҳт дар мувозинат қарор доранд, имконнопазир аст, зоро таркиби фазавии таҳшинҳо бо баланд шудани ҳарорат тағийир меёбад. Аз ҷумла, дар 50 °C дегидратсияи декагидрати сулфати 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 нуқтаи назар, агар маҳлули модарии системаи чоркомпонента, ки аз сулфатҳо, карбонатҳо ва гидрокарбонатҳои натрий иборат аст, аз нав кристалл карда шавад, аз он 6,21 г нахколит ҷудо кардан мумкин аст, зоро ҳалшавии NaHCO_3 дар 50 °C мебошад. 25 ва 0 °C мутаносибан 12,7 ва 9,31 г-ро ташкил медиҳад. Дар натиҷаи аз нав кристаллизатсия 3,16 г NaHCO_3 таҳшин ва ҷудо мешавад.

Мисоли 1. 25 кг маҳлули модарии ашёи хоми техникӣ, ки таркибаш аз сулфатҳо, карбонатҳо, гидрокарбонатҳо ва натрий иборат аст, дар ҳарорати тақрибан 0 °C дар тӯли 45 дақиқа бо маҳлулҳои ишқории 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 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 °C дар тӯли 100 дақиқа коркард карда мешавад. Пас аз тоза кардани маҳлул бо маҳлули спирти этилий ва филтратсия, 13,4775 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 кг таҳшинҳои ҳалнашаванда, ки асосан аз нахколит, мирабилит ва декагидрати карбонати натрий иборат аст, ба даст оварда мешавад. Филтрат ба даври истеҳсолот баргардонида мешавад. Истиҳроҷи умумии нахколит аз маҳлули ишқорӣ 51,10%-ро ташкил медиҳад.

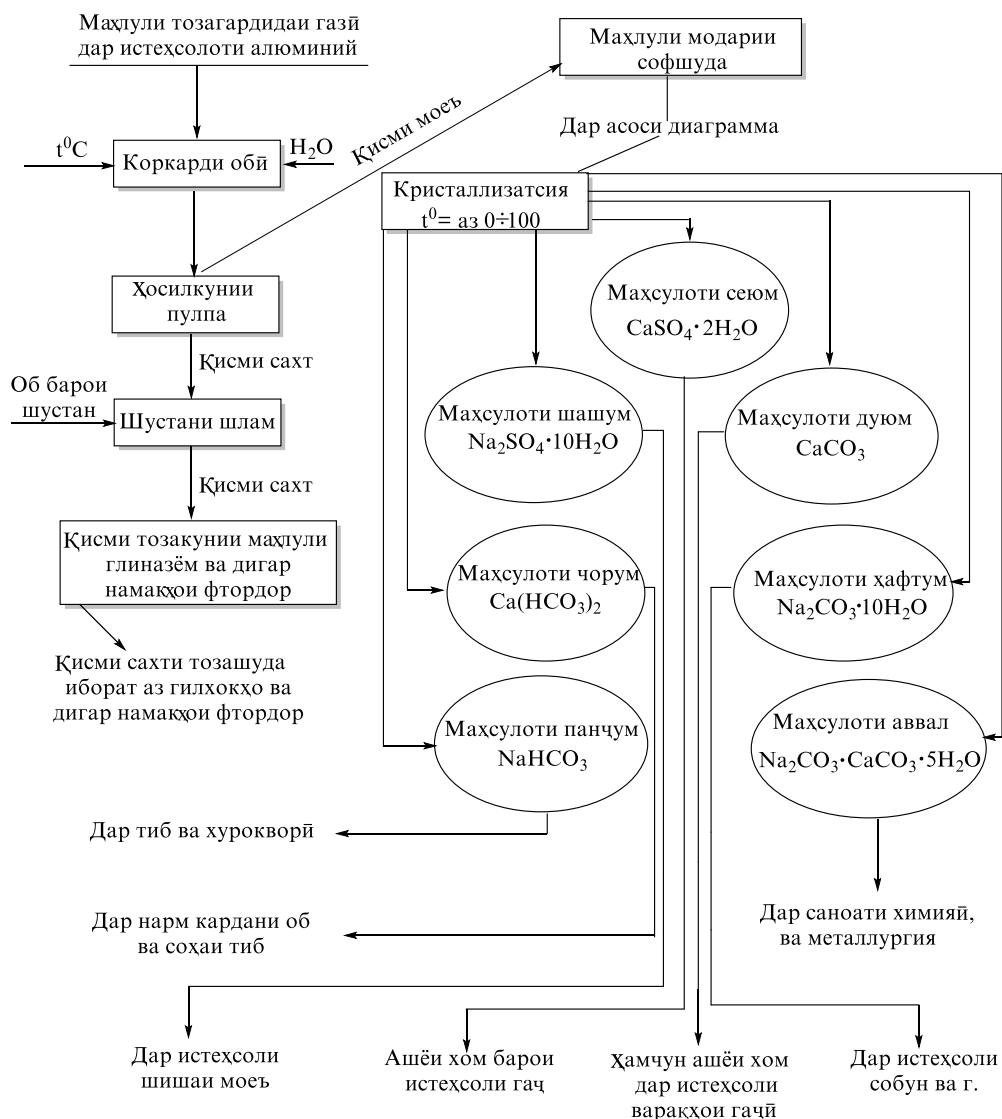
Мисоли 2. 25 кг маҳлули модарии ашёи хоми техникӣ, ки таркибаш аз сулфатҳо, карбонатҳо, гидрокарбонатҳо ва натрий иборат аст, дар ҳарорати тақрибан 25 °C дар тӯли 45 дақиқа бо усули маълум коркард карда мешавад. Маҳлул ғафс карда шуда, маҳлули ишқории сер аз боқимонда тоза карда мешавад. Боқимондаи гарм ба миқдори 19,15 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 кг ва об, дар ҳарорати аз 50 то 25 °C дар тӯли 100 дақиқа бо 5,6725 кг об коркард карда мешавад. Пас аз тоза кардани маҳлул бо маҳлули спирти этилий ва филтратсия, 13,4775 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 кг таҳшинҳои ҳалнашаванда, ки асосан аз нахколит, трон, мирабилит ва декагидрати карбонати натрий иборат аст, ба даст оварда мешавад. Филтрат ба даври истеҳсолот баргардонида мешавад. Истиҳроҷи умумии нахколит аз маҳлули ишқорӣ 62,40 %-ро ташкил медиҳад.

Мисоли 3. 25 кг маҳлули модарии ашёи хоми техникӣ, ки таркибаш аз сулфатҳо, карбонатҳо, гидрокарбонатҳо ва натрий иборат аст, дар ҳарорати тақрибан 50 °C дар тӯли 45 дақиқа бо усули маълум коркард карда мешавад. Маҳлул ғафс карда шуда, маҳлули ишқории сер аз боқимонда тоза карда мешавад. Боқимондаи гарм ба миқдори 19,15 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 кг ва об дар ҳарорати аз 50 то 0 °C дар тӯли 100 дақиқа бо 14,8275 кг об коркард карда мешавад. Пас аз тоза кардани маҳлул бо маҳлули спирти этилий ва филтратсия, 14,8275 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, зоро амалиёти хунуккӯни бοқимондаи ҳалнашаванда бо маҳлули ишқории партов ва амалиёти шустани нахколит аз таркиби чоркомпонентӣ аз нақша хориҷ карда шудааст.

Дар асоси диаграммаҳои соҳташуда схемаи принсиалии технологи кристаллизатсияи моддаҳои химиявӣ аз партовҳои моеъи саноатии истехсоли алюминий, ки комплекси фазагии системаи чоркомпоненти иборат аз сулфатҳо, 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, ҳатҳо ва нуқтаҳо коркард карда шуда, дар расми 18 оварда шудааст. Мувофиқ ба он ифода гардидааст, ки дар майдонҳои дивариантӣ як фаза, дар ҳатҳои моновариантӣ ду фаза ва дар нуқтаҳои нонвариантӣ 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 принсиалии технологи раванди кристаллизатсияи фазаҳои сахти алоҳида дар системаи $\text{H}_2\text{O}-5\text{Na}^+-\text{SO}_4^{2-}-\text{CO}_3^{2-}-\text{HCO}_3^-$

ХУЛОСАХОЙ УМУМЙ

1. Усули такмилёftai таҳқиқот, ки барои омӯзиши системаҳои бисёркомпонентай обӣ-намакӣ пешниҳод шудааст, аз инҳо иборат аст: а) пешгӯии мувозинати фазагӣ дар системаҳои бисёркомпонента, ки ба интиқоли ифодаҳои соҳтории системаҳои ҷуъии иборат аз n компонент ба минтақаи системаи умумии иборат аз n+1 компонент асос ёftааст; б) соҳтани диаграммаҳои комплекси фазагии системаҳои бисёркомпонента, ки дар онҳо ҳамаи мувозинатҳои фазагии имконпазир дар шаклҳои геометрӣ ва ҷойиршавии 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 изотермай комплексҳои фазавии системаҳои ҷорҷарон: $5\text{Na}^+ - \text{SO}_4^{2-} - \text{CO}_3^{2-} - \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$; $3\text{Ca}^{2+} - \text{SO}_4^{2-} - \text{CO}_3^{2-} - 2\text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$; $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}, \text{CO}_3^{2-} - \text{H}_2\text{O}$; $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$; $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+} \parallel \text{CO}_3^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$ ва 5 изотермай 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 алокаманд аст, ки инро принсипҳои асосии асосҳои таҳлили физико-химиявӣ ва қоиди фазаҳои Гибbs мувофиқат меқунад [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 қалсий, анионҳои сулфат, карбонат ва гидрокарбонат, ки бо усули транслятысия таҳқиқ гардида, соҳта шудаанд, аз рӯйи минтақаҳои кристаллизатсияи фазаҳои саҳти алоҳидай сатҳи таркиби ҷорҷаронта ва кристаллизатсияи муштараки ду фазаи сатҳи таркиби панҷкомпонента фрагментатсия карда шудаанд. Дар натиҷаи он фрагментҳои ҳудуди як фаза барои сатҳи таркиби ҷорҷаронтагӣ 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 соҳтори диаграммаҳои комплекси фазагии системаҳои бисёркомпонентай обӣ-намакӣ: а) нуқтаҳои нонвариантӣ системаи умумӣ асосан аз буриши қаҷхаттаҳои моновариантӣ, ки аз нуқтаҳои нонвариантӣ фазаҳои якхела сарчашма мегиранд, ҳосил мешаванд (*транслятысияи сетарафа*). Дар ҳолатҳои камтар, онҳо аз буриши қаҷхаттаи моновариантӣ, ки аз нуқтаҳои нонвариантӣ системаи ҷуъӣ сарчашма мегирад, бо қаҷхаттаи моновариантӣ, ки аз байни нуқтаҳои нонвариантӣ системаи умумӣ мегузаранд, ба вучуд меоянд (*транслятысияи яктарафа*). Нуқтаҳои нонвариантӣ, инчунин аз буриши қаҷхаттаҳои моновариантӣ, ки танҳо аз байни нуқтаҳои нонвариантӣ системаи умумӣ мегузаранд, ба вучуд меоянд (*нуқтаҳои мобайнӣ*). б) қаҷхаттаҳои моновариантӣ асосан дар натиҷаи транслятысияи нуқтаҳои нонвариантӣ системаи ҷуъӣ 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 транслятысияи қаҷхаттаҳои моновариантӣ системаи ҷуъӣ ба минтақаи таркиби умумӣ ба вучуд меоянд. Баъзан, онҳо ҳангоми транслятысияи қаҷхаттаҳои моновариантӣ, ки аз байни нуқтаҳои нонвариантӣ системаи ҷуъӣ ҳамаи мегузаранд. Инчунин, дар натиҷаи бо қаҷхаттаҳои 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 фазавӣ ва роҳҳои кристаллизатсия дар таҳқиқоти системаҳои обӣ-намакӣ, инчунин маълумоти тавсифи риёзии ҷараёни моделии раванд, усулҳои зерини оптимизатсияи ҷузъҳои технологий коркарди маъдани полиминералӣ (партовҳои истехсолӣ) 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 ҷорҷомпонентай 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 панҷкомпонентай $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}, \text{CO}_3^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$ дар 0 °C. Маълумоти таҷрибавии бадастомада, ки дурустии онҳо бо усулҳои таҳлили химиявӣ, кристаллооптикий ва рентгенофазавӣ тасдиқ шудааст, бо маълумоте, ки бо усули транслятсия ба даст омадаанд, пурра мувофиқат мекунанд [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 маводдҳои навро талаб менамояд, ба омӯзиши системаҳои даҳлдор 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 шашкомпонентай 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 сулфатҳои натрий ва калсий доранд. Равандҳои кристаллизатсия ва ҳалшавандагии намакҳо дар маҳлулҳои обии ин партовҳо бо қонуниятиҳои мувозинатҳои фазагӣ дар шакли системаи бисёркомпонента, системаҳои панҷ- ва ҷорҷомпонентай онро ташкилкунанда муайян карда мешаванд. Натиҷаҳои таҳқиқи политермаи ҳалшавандагӣ ва комплекси фазагӣ дар системаи бисёркомпонентай 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 додашуда фрагментатсия карда шуда, ҳосиятҳои топологии ифодаҳои геометрии ҳоси қисмҳои таркибии системаро ташкилкунанда муайян гардида, вобаста ба онҳо, зимни коркард дар майдонҳои сатҳи ҷорҷомпонента як фаза ва дар сатҳи панҷкомпонента ду фаза чудо карда шавад. Концентратсияи мувозинатӣ дар фазаҳои моеъ зимни кристаллизатсияи алоҳида барои майдон ва кристаллизатсияи якҷоя барои ҳатҳо ва нуқтаҳо муқаррар карда шавад.

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

ФЕХРИСТИ ИНТИШОРТИ ИЛМИИ ДОВТАЛАБИ ДАРЁФТИ ДАРАЧАИ ИЛМИЙ АЗ РЎЙИ 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 // SO₄, CO₃ - H₂O при 0÷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 илми тақризшавандай тавсиянамудаи КОА ҶТ ва дигар маҷаллаҳои таҳассусии илми пойгоҳи байналхалқӣ:

[4-М]. Солиев, Л. Ҳалшавандагӣ дар системаи Na₂SO₄-K₂SO₄-H₂O дар ҳарорати 50 °C / Л. Солиев, Ш.Х. Авлоев, М.Т. Жумаев // Паёми донишгоҳи омӯзгорӣ. Бахши илмҳои табии. -2009. -№ 2(34). -С.155-157.

[5-М]. Солиев, Л. Фазовые равновесия системы Na, Ca // SO₄, HCO₃ - H₂O 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 // CO₃ - HCO₃ -H₂O 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 // CO₃, HCO₃ - H₂O 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 // HCO₃, CO₃ - H₂O 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 CaSO₄-CaCO₃-Ca(HCO₃)₂-H₂O 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 // SO₄, CO₃ - H₂O 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 // SO₄, CO₃, HCO₃, F - H₂O 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 CaSO₄-CaCO₃-Ca(HCO₃)₂-H₂O 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 // SO₄, CO₃, HCO₃, F-H₂O 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 CaSO₄-CaCO₃-Ca(HCO₃)₂-H₂O 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, M.T. 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, M.T. 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, M.T. 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, M.T. 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, M.T. 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 Казахистана. -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, M.T. Jumaev, H.R. Makhmadov, B.B. Dzabborov // Chimica Techno Acta. -2018. -Vol. 5. -№ 2. -PP. 104-108.

[32-М]. Soliev, L. Solubility in the Quaternary CaSO₄-CaCO₃-CaF₂-H₂O System at 50 °C / L. Soliev, M.T. Jumaev, 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 || SO₄, HCO₃ - H₂O при 0 °C / Л. Солиев, М.Т. Джумаев, 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 || SO₄, HCO₃ - H₂O systems at 0 °C / L. Soliev, M.T. Jumaev, 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 || SO₄, CO₃, HCO₃ - H₂O systems at 50 °C / L. Soliev, M.T. Jumaev // Applied Solid State Chemistry. -2018. -№ 4(5). -PP. 192-198.

[36-М]. Soliev, L. Phase equilibria in the System Na, Ca || SO₄, CO₃, HCO₃ – H₂O at 0 °C / L. Soliev, M.T. Jumaev // Chimica Techno Acta. -2019. -Vol.6. -№1. -PP. 24-30.

[37-М]. Солиев, Л. Растворимость в системе Na, Ca || SO₄, F - H₂O 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 || SO₄, CO₃ - H₂O at 50 °C / L. Soliev, M.T. Jumaev, H.R. Makhmadov // Russian Journal of Inorganic Chemistry. -2019. -Vol.64. - № 2. -PP. 270-276.

[39-М]. Солиев, Л. Растворимость в системе K₂SO₄-K₂CO₃-KHCO₃–H₂O при 25 °C / Л. Солиев, М.Т. Жумаев, Б.М. Иброгимова // Политехнический вестник. Серия инженерные исследования. -2019. -№1(45). -С. 121-126.

[40-М]. 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. Muzaferova // American Scientific Journal. -2019. -Vol. 28. -№ 2. -PP. 49-55.

[41-М]. Солиев, Л. Таҳлили муқоисавии соҳтори комплекси фазагии системаи Na₂SO₄-Na₂CO₃-NaHCO₃–H₂O дар ҳарорати 75 ва 100 °C / Л. Солиев, М.Т. Жумаев, Р.О. Тураев, X.Р. Махмадов, Н.В. Олимчонова // Паёми донишгоҳи милли Тоҷикистон. Баҳши илмҳои табии. -2019. -№2. -С. 179-184.

[42-М]. Soliev, L. Solubility in the Na, Ca || SO₄, HCO₃ - H₂O system at 25 °C / L. Soliev, M.T. Jumaev, M. Varkaeva, H.R. Makhmadov // Chimica Techno Acta. -2019. -Vol.6. -№ 4. -PP. 130-137.

[43-М]. 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-М]. 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-М]. Soliev, L. Phase complex of the system Na, Ca || SO₄, CO₃, HCO₃–H₂O at 100 °C / L. Soliev, M.T. Jumaev // Chimica Techno Acta. -2020. -Vol.7. -№2. -PP. 71-80.

[46-М]. 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-М]. 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-М]. 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-М]. Солиев, Л. Фазовый комплекс взаимной системы Na, Ca || SO₄, CO₃ - H₂O при 75 и 100 °C / Л. Солиев, М.Т. Жумаев, X.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 $^{\circ}C$ / Л. Солиев, М.Т. Б.М. Ибрагимова, Жумаев, И.М. Низомов // Паёми донишгоҳи миллӣ Тоҷикистон. Бахши илмҳои табии. -2020. -№ 4. -С. 277-285.

[51-М]. Солиев, Л. Строение фазового комплекса системы K , Mg , Ca || SO_4 , Cl - H_2O при 0 $^{\circ}C$ / 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 $^{\circ}C$ / 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 || SO_4 , CO_3 , HCO_3 - H_2O дар ҳарорати 100 $^{\circ}C$ / Л. Солиев, М.Т. Жумаев // Паёми политехники. Бахши таҳқиқотҳои муҳандисӣ. -2021. -№ 2(54). -С. 49-56.

[54-М]. Солиев, Л. Таҳлили муқоисавии диаграммаи ҳалшавандагии системаи Na , Ca || SO_4 , CO_3 - H_2O дар ҳароратҳои 0, 25 ва 50 $^{\circ}C$ / Л. Солиев, М.Т. Жумаев, X.R. Махмадов, D.Z. Музafferova. Паёми донишгоҳи омӯзгорӣ. Бахши илмҳои табии. -2021. -№ 1 (10-11). -С. 253-257.

[55-М]. Солиев, Л. Строение фазового комплекса системы Na , K , Mg , Ca || SO_4 , Cl - H_2O при 0 $^{\circ}C$ в області 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. Дивариантные 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 $^{\circ}C$ / 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. Музafferova // 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 $^{\circ}C$ / Л. Солиев, М.Т. Жумаев, Б.М. Ибрагимова. Доклады НАН Таджикистана. -2022. -Т. 65. -№ 5-6. -С. 366-372.

[60-М]. Солиев, Л. Комплекси фазагии системаи K_2SO_4 - K_2CO_3 - $KHCO_3$ - KF - H_2O дар ҳарорати 25 $^{\circ}C$ / 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, M.T. Jumaev, I.M. Nizomov, Kh.R. Makhmadov, N.V. Olimjonova, D.V. Muzaferova // 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 $^{\circ}C$ / Л. Солиев, М.Т. Жумаев, X.R. Махмадов, D. Музafferova // Вестник таджикского национального университета. Серия естественных наук. -2022. -№ 3. -С. 123-130.

[63-М]. Солиев, Л. Строение фазового комплекса истемы KCl - $MgCl_2$ - $CaCl_2$ - H_2O при 0 $^{\circ}C$ / 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 $^{\circ}C$ / Л. Солиев, М.Т. Жумаев, D. Музafferova // Известия НАН Таджикистана. -2023. -№ 1(190). -С. 40-46.

[65-М]. Музafferova, D.Z. Фазообразование в системе Na , Ca , Al || SO_4 , CO_3 - H_2O при 273 К / D.Z. Музafferova, М.Т. Жумаев, L. Солиев // Доклады НАН Таджикистана. -2023. -Т. 66. -№ 3-4. -С. 223-230.

[66-М]. Олимчонова, Н.В. Фазообразование в системе Na , Ca , Al || SO_4 , HCO_3 - H_2O при 298 К / Н.В. Олимчонова, М.Т. Жумаев, L. Солиев // Известия НАН Таджикистана. -2023. -№ 2(191). -С. 223-230.

[67-М]. Олимджонова, Н.В. Сравнение фазовых равновесий в системе Na_2SO_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. Muzaferova, M.T. 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 табии. -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 °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. Параметрои концентратсионии ҳосилшавии фазаҳои саҳти мувозинатии системаи $\text{Ca}^{2+}\text{-SO}_4^{2-}\text{-CO}_3^{2-}\text{-2HCO}_3^-$ - H_2O дар ҳарорати 75 °C / М.Т. Жумаев, Ч.М. Мусоҷонзода, Л. Солиев // Паёми донишгоҳи технологи 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 $\text{H}_2\text{O}\text{-2Na}^+$ - $\text{Ca}^{2+}\text{-2Al-(SO}_4^{2-})_5$ барои 273 К / М.Т. Жумаев, Д.З. Музафарова, М. Раҳимова, Л. Солиев // Паёми донишгоҳи омӯзгорӣ. Бахши илмҳои табии. -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 °C / 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 // CO₃, HCO₃ - H₂O / 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 нонвариантных точках системы Na, Ca // SO₄, CO₃, HCO₃, F – H₂O при 25 °C 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 // SO₄, HCO₃ - H₂O при 0 и 25 °C / Л. Солиев, М.Т. Жумаев, Ш.Х. Авлоев // Матер. Междунар. конф. «Экологобезопасные и ресурсосберегающие технологии и материалы». -Улан-Уде. -2014. -С. 226-228.

[84-М]. Jumaev, M.T. Phase balance in system Na, Ca // SO₄, CO₃, HCO₃ - H₂O 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 // SO₄, CO₃, HCO₃, F - H₂O (изотерма 25 °C) / 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 четверых нонвариантных точек системы Na, Ca // SO₄, CO₃, HCO₃, F - H₂O при 25 °C / 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 // SO₄, CO₃, HCO₃ - H₂O 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 CaSO₄-CaCO₃-Ca(HCO₃)-H₂O 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-М]. Солиев, Л. Растворимости системы CaSO₄-CaCO₃-Ca(HCO₃)-H₂O 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-М]. Солиев, Л. О фазовых равновесиях в системе Na, Ca // SO₄, CO₃ - H₂O при 25 °C/ И. Борисов, М. Шолидодов, М. Джумаев, А. Набиев // Материалы II Всероссийской молодёжной конференции – школы с международным участием. «Достижения химии в агропромышленном комплекс». —Уфа. -2016. -С. 31-36.

[91-М]. Солиев, Л. Строение диаграммы растворимости системы Na, Ca // SO₄, CO₃ - H₂O 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-М]. Солиев, Л. Изотермы растворимости и фазовых равновесий системы Na, Ca // SO₄, CO₃ - H₂O 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-М]. Солиев, Л. Строение диаграммы фазовых равновесий в системе Na, Ca // CO₃, HCO₃ - H₂O 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-М]. Солиев, Л. Концентрационные параметры образования равновесных твёрдых фаз системы Na₂SO₄-Na₂CO₃-NaHCO₃-H₂O 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-М]. Солиев, Л. Растворимость системы $\text{Na}, \text{Ca} \parallel \text{SO}_4, \text{CO}_3 - \text{H}_2\text{O}$ 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 $\text{Na}, \text{Ca} \parallel \text{SO}_4, \text{CO}_3 - \text{H}_2\text{O}$ 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 $\text{Na}, \text{Ca} \parallel \text{SO}_4, \text{CO}_3 - \text{H}_2\text{O}$ 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 $\text{Na}, \text{Mg} \parallel \text{SO}_4, \text{CO}_3 - \text{H}_2\text{O}$ при 25°C / Л. Солиев, М.Т. Жумаев, Б. Джабборзода // Сборник статей по итогам междун. науч. практ. конф. -Стерлитамак. -2020. -С.118.

[99-М]. Солиев, Л. Строение фазового комплекса системы $\text{Na}, \text{K}, \text{Mg}, \text{Ca} \parallel \text{SO}_4, \text{Cl} - \text{H}_2\text{O}$ 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 нонвариантных точек системы $\text{Na}, \text{Ca} \parallel \text{SO}_4, \text{CO}_3, \text{HCO}_3 - \text{H}_2\text{O}$ 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 $\text{K}_2\text{SO}_4 - \text{KHCO}_3 - \text{KF} - \text{H}_2\text{O}$ при 0°C / 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-М]. Жумаев М.Т. Строение диаграммы фазовых равновесий в системе $\text{Na}, \text{Ca} \parallel \text{SO}_4, \text{CO}_3, \text{HCO}_3 - \text{H}_2\text{O}$ 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 $\text{Na}, \text{Ca} \parallel \text{SO}_4, \text{CO}_3, \text{HCO}_3 - \text{H}_2\text{O}$ при 100°C / М.Т. Жумаев, Л. Солиев // Материалы Республиканской конференции «Современное состояние и перспективы физико-химические 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-конференции 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 // Материалы Междун. науч. 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 $\text{CaSO}_4 - \text{CaCO}_3 - \text{Ca}(\text{HCO}_3)_2 - \text{H}_2\text{O}$ 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 $3\text{Ca}^{2+} - \text{SO}_4^{2-} - \text{O}_3^{2-} - 2\text{HCO}_3 - \text{H}_2\text{O}$ дар ҳарорати 75°C / М.Т. Жумаев, Л. Солиев // Маводи конференсияи байналмилалии илмий-амалӣ дар мавзуи «Нақши химия ва саноати химияйӣ дар саноатикунионии 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 °C / 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. практ. 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. практ. конф. «Булатовские чтения». –Красноярск. -2025. -С.173.

[113-М]. Жумаев, М.Т. Растворимость системы 3Ca²⁺-SO₄²⁻-O₃²⁻-2HCO₃⁻-H₂O при 75 °C / 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 °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-М]. Жумаев, М.Т. Мувозинатҳои дивариантӣ дар системаи бисёркомпонентаи Na⁺, Ca²⁺ || SO₄²⁻, CO₃²⁻, HCO₃⁻ - H₂O / М.Т. Жумаев, Л. Солиев // Хонишҳои XX Нӯъмоновӣ дар мавзӯи: «Марҳилаҳои мусоири рушди илмҳои кимиёвӣ ва техники: масъалаҳои мубрами назария ва амалия». -Душанбе. -2025. -С. 70-74.

[116-М]. Жумаев, М.Т. Соҳтори диаграммаи системаи CaCO₃-CaF₂-Al₄Si₄O₁₀(OH)₈-TiO₂ / М.Т. Жумаев, А.Ш. Муродиён, Л.Солиев // Маводи конференсияи байналхалқии илмӣ-назариявии «Марҳилаҳои ҳозираи инкишофи илмҳои табиатшиносӣ, дақiq ҷаҳонӣ 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 °C / М.Т. Жумаев, Л. Солиев // «V-Байкальском материаловедческом форум». -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 металurgия дар шароити саноатикуонии 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 ТАГОЙМУРОТОВИЧ

**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 колloidной 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. Общепризнанными 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 $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}, \text{CO}_3^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$ в температурном интервале ${}^0\text{C}$ 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 $\text{Na}, \text{K}, \text{Mg}, \text{Ca} \parallel \text{SO}_4, \text{Cl}-\text{H}_2\text{O}$ («морской системе»). Работы охватывали температурный интервал $0\div100 {}^0\text{C}$ 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 $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}, \text{CO}_3^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$ 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^+ , Al^{3+} || 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 нонвариантных 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^+ , Ca^{2+} || 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 ; $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, CO_3^{2-} - H_2O ; $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+} \parallel \text{CO}_3^{2-}$, 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 вариантиности (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 химии (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 «Наќши химия ва саноати химияи дар саноатикуонии Тољикистон» (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 «Пайвастҳои 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 профильных 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 полимеры фазового комплекса химических систем и анализ степени изученности полимеры 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 полимеры 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 полимеры 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 полимеры 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 $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{CaCO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$; Cs - 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; МС - 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



Графическое представление диаграмм водно-солевых взаимных систем осуществляется с помощью нескольких методов. Например, при использовании метода Левенгерса концентрации веществ выражаются в молях-эквивалентах, отнесённых к 100 молям (или 1000 молям) воды, а в качестве координатных осей принимаются 4 ребра полуоктаэдра, 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 проектировалась 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 Левенгерса для графического изображения пятикомпонентной системы $\text{Na}, \text{K}, \text{Mg} \parallel \text{SO}_4, \text{Cl} - \text{H}_2\text{O}$. 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 нонвариантных 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 °С. 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 (нонвариантные 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 снизу - 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 нонвариантные эвтонические и эвтектические точки. Пограничные линии могут быть конгруэнтными и инконгруэнтными. Траектории кристаллизации определяются аналогично тому, как это делается для обычных трёхкомпонентных систем.

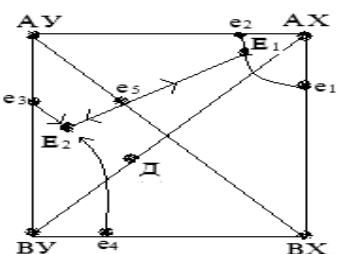


Рисунок 1. – Диаграмма состояния необратимого взаимного обмена со стабильной диагональю $\text{AX}-\text{BY}$

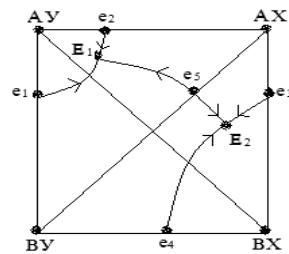


Рисунок 2. – Диаграмма состояния необратимого взаимного обмена со стабильной диагональю $\text{AY}-\text{BX}$

На рисунке 1 показана одна из таких диаграмм, где диагональ АY-BX разделяет общую диаграмму на две обычные трёхкомпонентные системы: BX-AY-AX и BX-AY-BY. В каждой из этих трёхкомпонентных систем присутствуют все соответствующие геометрические элементы. Для первой трёхкомпонентной системы (BX-AY-AX): трёхфазная эвтектика E_1 с тремя пограничными линиями e_{1e_1} , e_{1e_2} и e_{1e_5} . Для второй трёхкомпонентной системы (BX-AY-BY): трёхфазная эвтоника E_2 с тремя пограничными линиями e_{2e_3} , e_{2e_4} и e_{2e_5} . В первой системе присутствуют поля кристаллизации: $AU_{e_2}E_{1e_5}$ (для компонента AY); $AX_{e_2}E_{1e_1}$ (для компонента AX) и $BX_{e_1}E_{1e_5}$ (для компонента BX). Во второй системе присутствуют поля: $BY_{e_3}E_{2e_4}$ (для компонента BY); $BX_{e_4}E_{2e_5}$ (для компонента BX) и $AU_{e_3}E_{2e_5}$ (для компонента AY). Поле кристаллизации компонента AY объединяется с его полем во второй системе. Аналогичная ситуация имеет место для поля кристаллизации BX. Таким образом, на представленной диаграмме присутствуют четыре поля кристаллизации.

Диагональ АY-BX 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 эвтониками, 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 эвтониках системы, показанной на рисунке 1, кристаллизуется смесь солей AY-BX-AX (эвтектика E_1) и BY+AY+BX (эвтектика E_2). Пара солей, входящих в состав конечного продукта затвердевания эвтектического расплава, называется стабильной (устойчивой) парой. Другой диагональный разрез (AX-BY) 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 AX, ни - BY, а образуется соль BX, которая является продуктом взаимодействия AX и BY. На второй стадии кристаллизации образуется смесь солей BX+BY, а на третьей стадии - совокупность солей BX, BY и AY, образующих стабильную диагональ.

На рисунке 2 представлена диаграмма взаимной трёхкомпонентной системы A, // X, Y со стабильной диагональю AX-BY, 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.

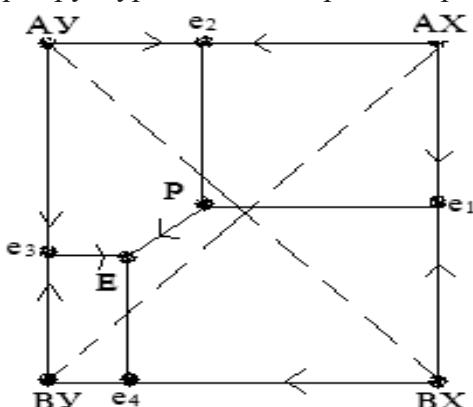


Рисунок 3. – Диаграмма состояния обратимой взаимной трёхкомпонентной системы

На рисунке 3 точка Р соответствует равновесию трёх твёрдых фаз AX+AY+BX 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 AX растворяется, а соли AY и BX выделяются. Если в исходной смеси отсутствует необходимое количество компонента BY для полного превращения солей AX и AY, то кристаллизация завершается в перитектической точке (P). В противном случае, кристаллизация завершается в эвтонической точке с образованием совокупности солей AX, BX и BY. В таких обратимо-взаимных диаграммах нонвариантные точки локализуются по одну сторону от диагонали, соединяющей пары солей системы.

Пара солей, в нашем примере AX+AY, которая выделяется в обеих нонвариантных 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 представлена в таблице 1.

Таблица 1. – Пятикомпонентная система Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, CO_3^{2-} , HCO_3^- , SO_4^{2-} , - H_2O , её трёх-, четырёхкомпонентные подсистемы и состояние их изученности

Системы	К-ность	Изотерма, $^{\circ}\text{C}$				
		0	25	50	75	100
$\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}, \text{CO}_3^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$	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	+	+	+	+	+
$3\text{Na}^+ \parallel \text{SO}_4^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$	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	-	-	-	-	-

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, $5\text{Na}^+ - \text{SO}_4^{2-} - \text{CO}_3^{2-} - \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$ была частично изучена на трёхкомпонентном уровне, однако, полные диаграммы растворимости или фазовых комплексов для неё отсутствуют. Системы $3\text{Ca}^{2+} - \text{SO}_4^{2-} - \text{CO}_3^{2-} - 2\text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$, $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}, \text{CO}_3^{2-} - \text{H}_2\text{O}$, $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$, $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+} \parallel \text{CO}_3^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$ 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^+ , Ca^{2+} || 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 5Na^+ - SO_4^{2-} - CO_3^{2-} - HCO_3^- - H_2O с общим ионом (Na^+) в интервале температур $0 \div 100$ $^\circ\text{C}$. Изотерма 0 $^\circ\text{C}$. Согласно литературным источникам, трёхкомпонентные подсистемы: 3Na^+ - SO_4^{2-} - HCO_3^- - H_2O ; 3Na^+ - CO_3^{2-} - HCO_3^- - H_2O и 4Na^+ - SO_4^{2-} - CO_3^{2-} - H_2O хорошо изучены при 0 $^\circ\text{C}$. Они характеризуются одной нонвариантной точкой каждой: E_1^3 , E_2^3 и E_3^3 с твёрдыми фазами $\text{Mb}+\text{Nk}$, $\text{Na}10+\text{Nk}$ и $\text{Mb}+\text{Na}10$. Эти точки, после трансляции и ограничения на уровне общего четырёхкомпонентного состава, сливаются в одну нонвариантную точку E_1^4 с равновесием фаз $\text{Mb} + \text{Na}\cdot 10 + \text{Nk}$.

Изотерма 25 $^\circ\text{C}$. На данной изотерме количество нонвариантных точек в трёхкомпонентных подсистемах составляет: 3Na^+ - SO_4^{2-} - HCO_3^- - $\text{H}_2\text{O} - E_1^3 = \text{Mb} + \text{Nk}$; 3Na^+ - CO_3^{2-} - HCO_3^- - $\text{H}_2\text{O} - E_2^3 = \text{Mb} + \text{Tr}$, $E_3^3 = \text{Tr} + \text{Na}10$; 4Na^+ - SO_4^{2-} - CO_3^{2-} - $\text{H}_2\text{O} - E_4^3 = \text{Na}10 + \text{Mb}$. В результате добавления четвёртого компонента и трансформации на общем уровне, нонвариантные точки транслируются, образуя две нонвариантные **точки** E_1^4 и E_2^4 с равновесными фазами $\text{Mb} + \text{Nk} + \text{Tr}$ и $\text{Na}10 + \text{Tr} + \text{Mb}$, соответственно.

Изотермы 50 ва 75 $^\circ\text{C}$. 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 3Na^+ - SO_4^{2-} - HCO_3^- - H_2O , $E_2^3 = \text{Nk}+\text{Tr}$, $E_3^3 = \text{Na}1+\text{Tr}$ для системы 3Na^+ - CO_3^{2-} - HCO_3^- - H_2O и $E_4^3 = \text{Te}+\text{Br}$, $E_5^3 = \text{Br}+\text{Na}\cdot 1$ для системы 4Na^+ - SO_4^{2-} - CO_3^{2-} - H_2O . На уровне следующего компонентного состава (четырёхкомпонентного) нонвариантные равновесия системы включают: E_2^4 : фазы $\text{Na}1 + \text{Br} + \text{Tr}$; E_3^4 : фазы $\text{Nk} + \text{Br} + \text{Tr}$. Как видно, фазовые равновесия в изотермах 50 и 75 $^\circ\text{C}$ идентичны.

Изотерма 100 $^\circ\text{C}$. Увеличение температуры от 75 до 100 $^\circ\text{C}$ вызывает фазовое превращение в подсистеме 3Na^+ - CO_3^{2-} - HCO_3^- - H_2O . 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 $^\circ\text{C}$ в данной четырёхкомпонентной системе наблюдается максимальная насыщенность геометрическими элементами. Четверные нонвариантные точки, определяющие границы фазовых полей на данном изотермическом уровне, представлены следующими равновесными ассоциатами: $E_6^4 = \text{Nk} + \text{Te} + \text{Gb}$; $E_7^4 = \text{CaH} + \text{Gb} + \text{Gp}$; $E_8^4 = \text{Gb} + \text{CaH} + \text{Nk}$.

Политерма системы 3Ca^{2+} - SO_4^{2-} - CO_3^{2-} - 2HCO_3^- - H_2O (с общим ионом Ca^{2+}) в интервале $0 \div 100$ $^\circ\text{C}$. Система 3Ca^{2+} - SO_4^{2-} - CO_3^{2-} - 2HCO_3^- - H_2O 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: 2Ca^{2+} - SO_4^{2-} - CO_3^{2-} - H_2O , 2Ca^{2+} - SO_4^{2-} - 2HCO_3^- - H_2O и 2Ca^{2+} - CO_3^{2-} - 2HCO_3^- - H_2O . Анализ

литературных данных показывает, что эта четырёхкомпонентная система не изучена. Для неё теоретически возможны следующие простые эвтонические нонвариантные точки на уровне трёхкомпонентных подсистем: $2\text{Ca}^{2+}\text{-SO}_4^{2-}\text{-CO}_3^{2-}\text{-H}_2\text{O} - E_1^3 = \text{Gp} + \text{CaH}$; $2\text{Ca}^{2+}\text{-SO}_4^{2-}\text{-2HCO}_3^- \text{-H}_2\text{O} - E_2^3 = \text{Cc} + \text{CaG}$ и $2\text{Ca}^{2+}\text{-CO}_3^{2-}\text{-2HCO}_3^- \text{-H}_2\text{O} - E_3^3 = \text{Gp} + \text{Cc}$. В результате трансляции (добавления четвёртого компонента) в общую систему, эти нонвариантные точки объединяются в одну нонвариантную точку четырёхкомпонентного состава, которую можно математически представить как: $E_1^3 + E_2^3 + E_3^3 \rightarrow E_1^4 = \text{Gp} + \text{Cc} + \text{CaH}$. Такое фазовое равновесие характерно для всей области температур $0\text{--}100^\circ\text{C}$ в данной системе.

Политерма четырёхкомпонентной взаимной водно-солевой системы сульфатов и карбонатов натрия и кальция в интервале $0\text{--}100^\circ\text{C}$. Изотерма 0°C . 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°C пятью нонвариантными точками. Их можно транслировать на уровень четырёхкомпонентного состава. Это приведёт к образованию трёх нонвариантных точек E_1^4 , E_2^4 и E_3^4 . Они имеют следующие равновесные фазы: $\text{Mb} + \text{Gl} + \text{Na}\cdot10$, $\text{Gp} + \text{Cc} + \text{Gl}$ и $\text{Mb} + \text{Gp} + \text{Gl}$.

Изотерма 25°C . На данной изотерме увеличивается количество геометрических элементов, особенно нонвариантных 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 нонвариантных равновесий в исследуемой подсистеме: $\text{Mb} + \text{Na}\cdot10$ для точки E_1^3 ; $\text{Gb} + \text{Mb} = E_2^3$; $\text{Gp} + \text{Gb} = E_3^3$; $\text{Cc} + \text{Gp} = E_4^3$; $\text{Na}\cdot10 + \text{Gl} = E_5^3$ 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 четырехкомпонентного состава системы установлены стабильные ассоциаты равновесных фаз, локализованные в соответствующих нонвариантных точках: $\text{Mb} + \text{Na}10 + \text{Gb}$, $\text{Gb} + \text{Gp} + \text{Cc}$, $\text{Na}10 + \text{Gl} + \text{Gb}$, $\text{Gl} + \text{Gb} + \text{Cc}$ для точек E_7^4 , E_8^4 , E_9^4 и E_{10}^4 .

Изотерма 50°C . Повышение температуры с 25 до 50°C 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 термонатрит. В дальнейшем эти соединения вступают в химическое взаимодействие, образуя новую фазу — беркеит, что изменяет структуру диаграммы при 50°C . На четырёхкомпонентном уровне система характеризуется следующими нонвариантными точками с соответствующими равновесными твёрдыми фазами: $E_8^3 = \text{Te} + \text{Br} + \text{Gp}$; $E_9^3 = \text{Gb} + \text{Gp} + \text{Cc}$; $E_{10}^3 = \text{Br} + \text{Pr} + \text{Na}1$; $E_{11}^3 = \text{Gb} + \text{Pr} + \text{Cc}$; $E_{12}^3 = \text{Gb} + \text{Pr} + \text{Br}$.

Изотерма 75°C . В ходе исследования установлено, что максимальное количество геометрических форм в данной системе наблюдается на изотерме 75°C . Это связано с образованием новой равновесной фазы — $5\text{Ca}\cdot\text{Na}\cdot3$. 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. Нонвариантные равновесия отмечены в трёхкомпонентных подсистемах: $4\text{Na}^+\text{-SO}_4^{2-}\text{-CO}_3^{2-}\text{-H}_2\text{O}$, $E_{12}^3 = \text{Te} + \text{Gb}$; $E_{13}^3 = \text{Gb} + 5\text{Ca}\cdot\text{Na}\cdot3$; $E_{14}^3 = \text{Gp} + 5\text{Ca}\cdot\text{Na}\cdot3$ в системе $2\text{Na}^+\text{-Ca}^{2+}\text{-SO}_4^{2-}\text{-H}_2\text{O}$, $E_8^3 = \text{Cc} + \text{Gp}$ в системе $2\text{Ca}^{2+}\text{-CO}_3^- \text{-SO}_4^{2-}\text{-H}_2\text{O}$, $E_{15}^3 = \text{Na}1 + \text{Pr}$; $E_{16}^3 = \text{Pr} + \text{Cc}$ в системе $2\text{Na}^+\text{-Ca}^{2+}\text{-CO}_3^{2-}\text{-H}_2\text{O}$. Равновесные фазы установлены в нонвариантных точках четырёхкомпонентного состава: $E_9^4 = \text{Te} + \text{Br} + \text{Gb}$;

$E_{10}^4 = Na_1 + Br + Pr$; $E_{11}^4 = 5Ca \cdot Na \cdot 3 + Gp + Cc$; $E_{12}^4 = Br + Gb + 5Ca \cdot Na \cdot 3$; $E_{13}^4 = Cc + Pr + 5Ca \cdot Na \cdot 3$ ва $E_{14}^4 = Br + Pr + 5Ca \cdot Na \cdot 3$.

Изотерма 100 °C. На этой изотерме в результате температурного воздействия исчезает фаза $5Ca \cdot Na \cdot 3$, которая была стабильна при 75 °C, что приводит к некоторому упрощению структуры диаграммы фазового комплекса. Отмечены нонвариантные точки трёхкомпонентных подсистем: $4Na^+ - SO_4^{2-} - CO_3^{2-} - H_2O - E_5^3 = Te + Br$, $E_6^3 = Br + Na_1$; система $2Na^+ - Ca^{2+} - 2SO_4^{2-} - H_2O - E_{13}^3 = Te + Gb$, $E_{14}^3 = Gb + Gp$; системы $2Ca^{2+} - CO_3^{2-} - SO_4^{2-} - H_2O - E_9^3 = Cc + Gp$; системы $2Na^+ - Ca^{2+} - 2CO_3^{2-} - H_2O - E_{15}^3 = Na_1 + Pr$, $E_{16}^3 = Pr + Cc$. Нонвариантные точки четырёхкомпонентного состава, образованные в результате ограничения моновариантных линий со своими равновесными твёрдыми фазами: $E_9^4 = Te + Br + Gb$; $E_{10}^4 = Na_1 + Br + Pr$; $E_{11}^4 = Gb + Gp + Cc$; $E_{12}^4 = Cc + Gb + Pr$ и $E_{13}^4 = Br + Pr + Gb$.

Политерма четырёхкомпонентной водно-солевой взаимной системы сульфатов и гидрокарбонатов натрия и кальция в интервале 0÷100 °C. Изотерма 0 °C. 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 нонвариантная точка: $E_1^3 = Mb + Nk$, $E_2^3 = Nk + CaH$, $E_3^3 = Gp + CaH$ и $E_4^3 = Mb + Gp$. Нонвариантные точки четырёхкомпонентной системы, полученные в результате трансляции на изотерме 0 °C E_3^4 и E_4^4 со следующими равновесными фазами: $Gp + Mb + Nk$ ва $Gp + Nk + CaH$.

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

Изотерма 50 °C. Количество геометрических форм в системе на изотерме 50 °C равно их количеству на изотерме 25 °C. 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 $Te + Nk$ ва $Gb + Te$.

Изотерма 75 °C. Геометрические формы, которые при ограничении общего компонентного пространства образуют нонвариантные точки на общем компонентном уровне, более многочисленны по сравнению с изотермой 50 °C (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. Нонвариантные точки трёхкомпонентного состава и их равновесные фазы: $E_9^3 = Nk + Te$; $E_{10}^3 = CaH + Nk$; $E_{11}^3 = Gp + CaH$; $E_{12}^3 = Te + Gp$; $E_{13}^3 = Gb + 5Ca \cdot Na \cdot 3$; $E_{14}^3 = 5Ca \cdot Na \cdot 3 + Gp$. Нонвариантные точки четырёхкомпонентного состава: $Nk + Te + Gb = E_5^4$, $CaH + Gp + 5Ca \cdot Na \cdot 3 = E_6^4$, $Gb + CaH + Nk = E_7^4$, $Gb + CaH + 5Ca \cdot Na \cdot 3 = E_8^4$.

Изотерма 100 °C. Повышение температуры от 75 до 100 °C 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 °C. Нонвариантные точки четырёхкомпонентного состава: $E_6^4 = Nk + Te + Gb$; $E_7^4 = CaH + Gp + Gb$; $E_8^4 = Gb + CaH + Nk$.

Политерма четырёхкомпонентной водно-солевой взаимной системы карбонатов и гидрокарбонатов натрия и кальция 0÷100 °C. Изотерма 0 °C. 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 $^{\circ}\text{C}$ для подсистем характерно 5 нонвариантных точек. Их трансляция на уровень четырёхкомпонентного состава приводит к образованию трёх нонвариантных точек E_8^4 , E_9^4 и E_{10}^4 со следующими равновесными фазами: $\text{Na}\cdot 10 + \text{Nk} + \text{Gl}$, $\text{Cc} + \text{Gl} + \text{CaH}$ в $\text{Nk} + \text{CaH} + \text{Gl}$.

Изотерма 25 $^{\circ}\text{C}$. На данной изотерме увеличивается количество геометрических форм, особенно нонвариантных 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 нонвариантных 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 $^{\circ}\text{C}$. Повышение температуры в интервалах 25 до 50 и от 50 до 75 $^{\circ}\text{C}$ 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 гейлюссита с образованием пирсонита.

Изотерма 100 $^{\circ}\text{C}$. Установлено, что максимальное количество геометрических форм в данной системе наблюдается на изотерме 100 $^{\circ}\text{C}$. 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 $2\text{Na}^{+}-\text{Ca}^{2+}-2\text{CO}_3^{2-}-\text{H}_2\text{O}$, $E_{20}^3 = \text{Cc} + \text{CaH}$ в системе $2\text{Ca}^{2+}-\text{CO}_3^{2-}-2\text{HCO}_3^{-}-\text{H}_2\text{O}$, $E_{21}^3 = \text{CaH} + \text{Nk}$ в системе $\text{Na}^{+}-\text{Ca}^{2+}-3\text{HCO}_3^{-}-\text{H}_2\text{O}$. 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, нонвариантные 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, нонвариантные 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 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».

Определенные 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: $E_1^4-E_1^5$; $E_2^4-E_1^5$; $E_3^4-E_2^5$; $E_4^4-E_3^5$). Они могут возникать как соединительные линии между нонвариантными точками общей системы (на рисунке 4, б обозначены жирными сплошными линиями: $E_1^5-E_2^5$; $E_1^5-E_4^5$; $E_3^5-E_4^5$). 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 $E_1^4-E_2^4$, $E_2^4-E_3^4$ и $E_1^4-E_4^4$ в область пятикомпонентного состава. Они также возникают в результате

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

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

- определение нонвариантных 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.

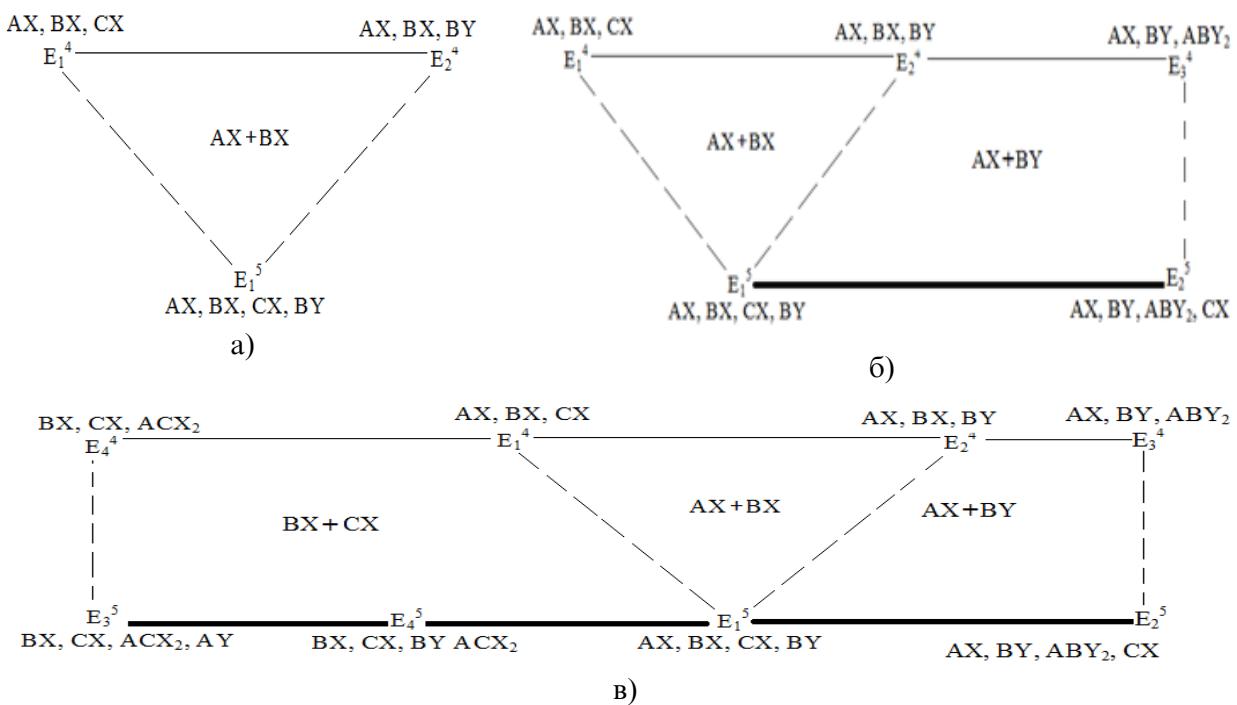


Рисунок 4. – Трансляция геометрических форм фрагмента системы A, B, C || X, Y - H₂O
а) сквозная; б) односторонняя; в) промежуточная

Необходимо подчеркнуть, что при построении диаграмм фазового комплекса МКС не всегда требуется выполнение всех вышеупомянутых этапов. Например, если все нонвариантные 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 нонвариантных точек, и так далее.

Политерма диаграммы фазового комплекса пятикомпонентной системы Na⁺, Ca²⁺ || SO₄²⁻, CO₃²⁻, HCO₃⁻ – H₂O. 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: $4\text{Na}^+ - \text{SO}_4^{2-} - \text{CO}_3^{2-} - \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$; $3\text{Ca}^{2+} - \text{SO}_4^{2-} - \text{CO}_3^{2-} - 2\text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$; $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}, \text{CO}_3^{2-} - \text{H}_2\text{O}$; $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$; $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+} \parallel \text{CO}_3^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$. 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 $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}, \text{CO}_3^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$ на уровне четырёхкомпонентного состава характеризуется нонвариантными точками (HT) со следующими фазовыми составами осадков (табл. 2):

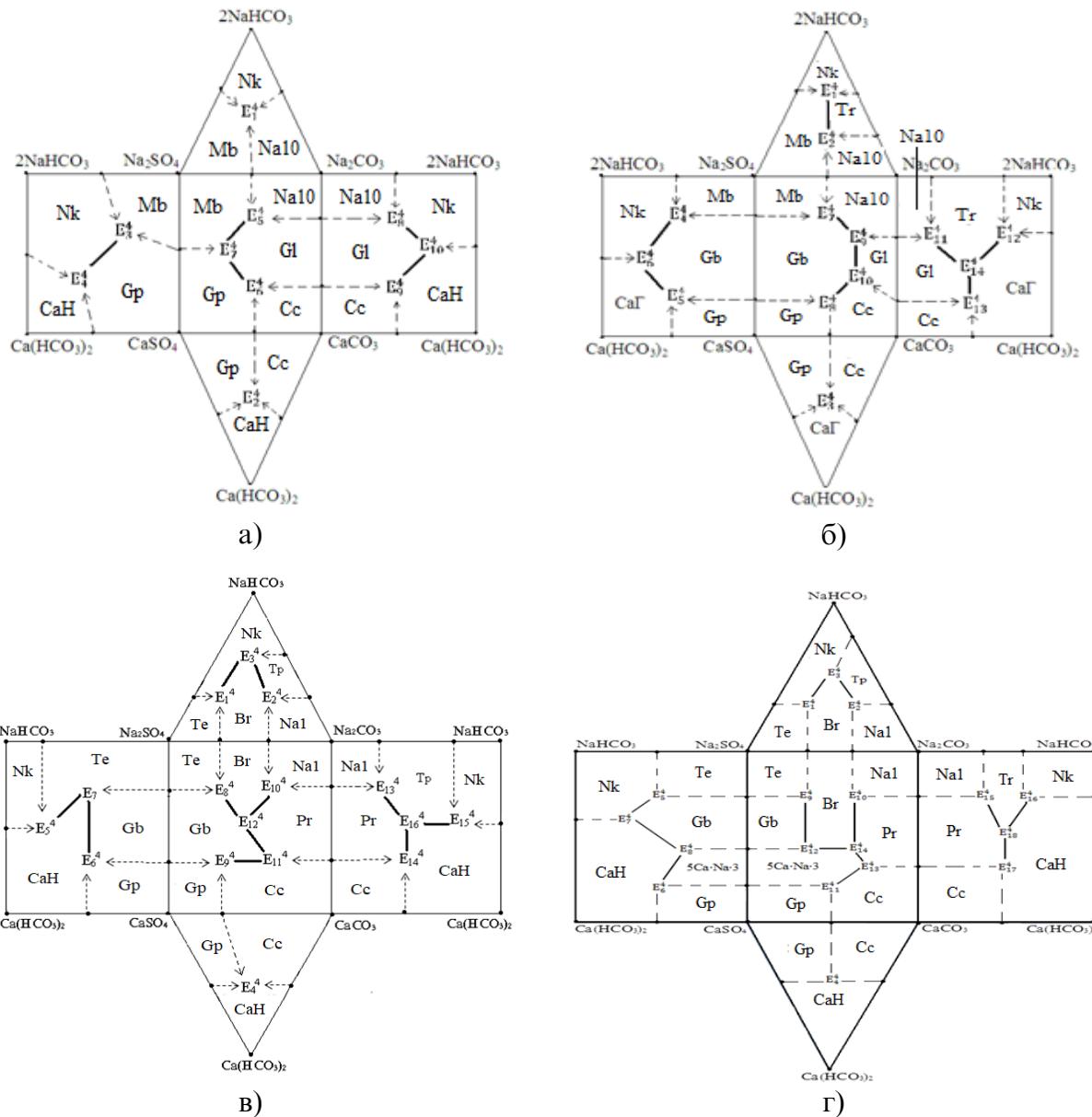
Таблица 2. – Четверные нонвариантные точки системы $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}, \text{CO}_3^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$ в интервале температур $0 \div 100^\circ\text{C}$

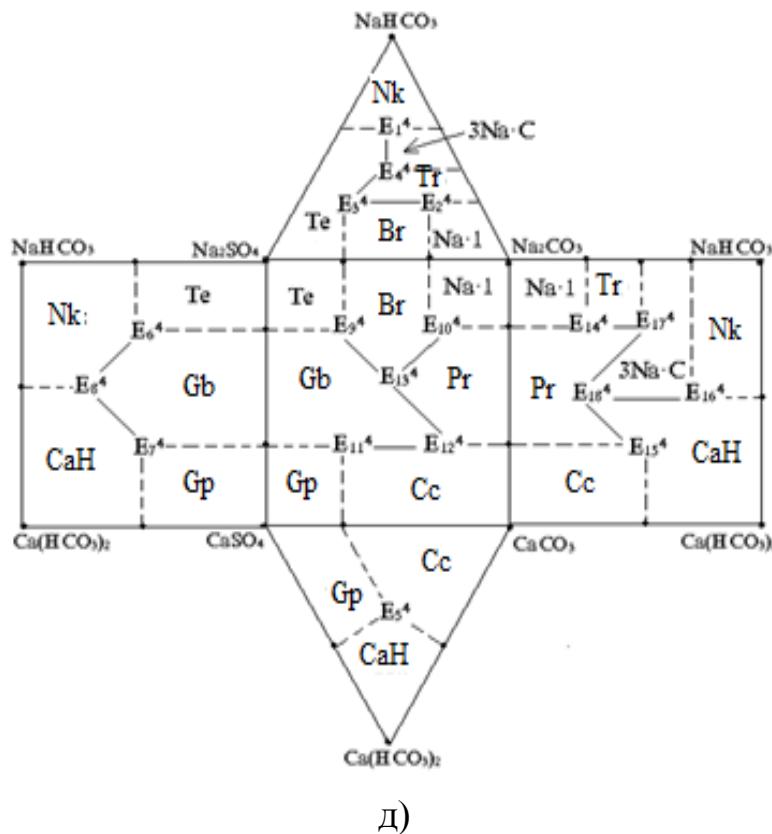
Изотерма, $^\circ\text{C}$	Нонвариантные точки	Равновесные твёрдые фазы	Нонвариантные точки	Равновесные твёрдые фазы
1	2	3	4	5
0	E_1^4	$\text{Mb} + \text{Na10} + \text{Nk}$	E_2^4	$\text{Gp} + \text{CaH} + \text{Cc}$
	E_3^4	$\text{Mb} + \text{Nk} + \text{Gp}$	E_4^4	$\text{Nk} + \text{Gp} + \text{CaH}$
	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	$Te + Tr + 3Na \cdot C$
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	$3Na \cdot C + Nk + CaH$
E_{17}^4	$Pr + Tr + 3Na \cdot C$	E_{18}^4	$Pr + 3Na \cdot C + CaH$

Как видно из таблицы 2, количество нонвариантных 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.

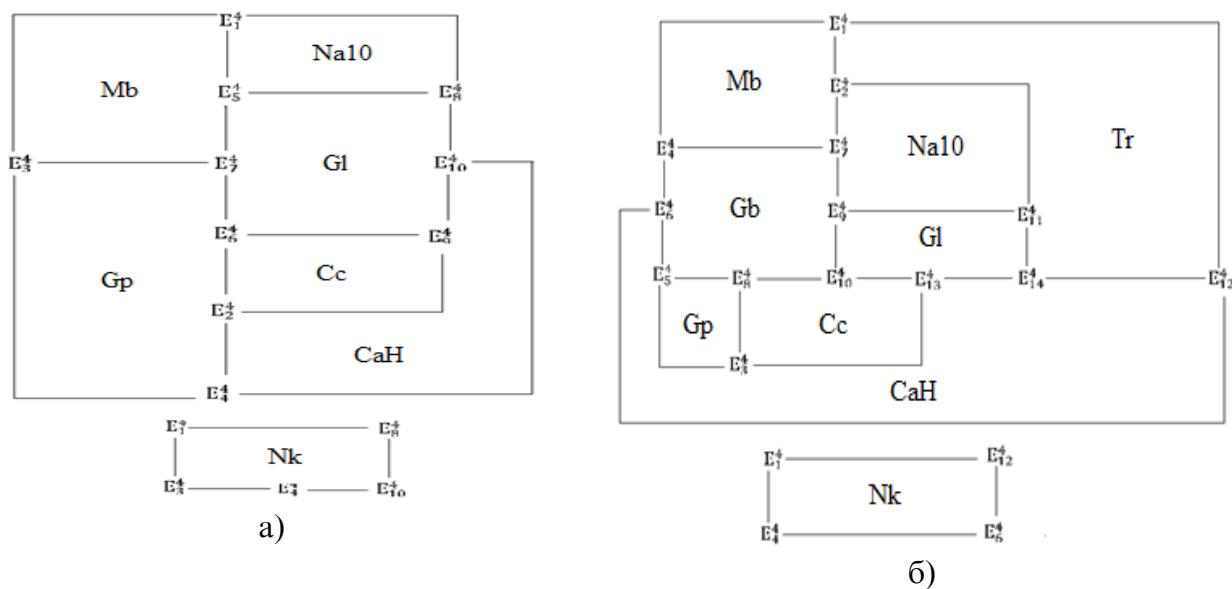




д)

Рисунок 5. – Изотермы открытой четверной призмы системы Na^+ , Ca^{2+} || CO_3^{2-} , HCO_3^- - H_2O : 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.



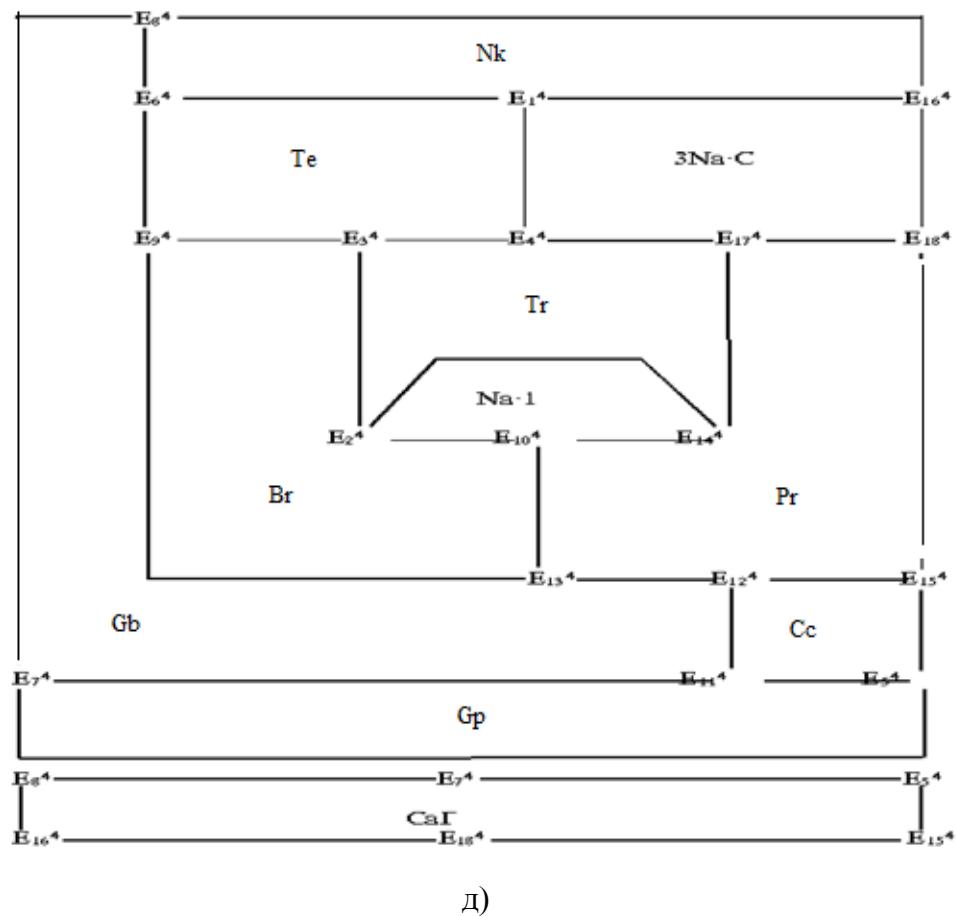
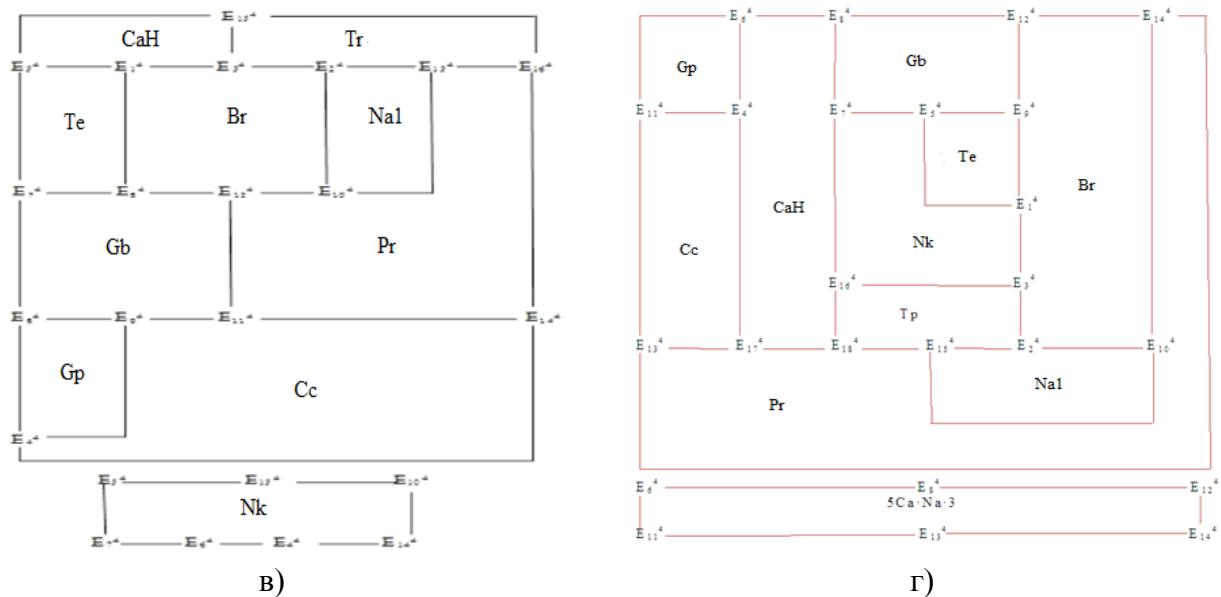


Рисунок 6. – Унифицированная форма диаграммы уровня четырехкомпонентного состава системы $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+} \parallel \text{CO}_3^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$: а) 0 °C; б) 25 °C; в) 50 °C; г) 75 °C; д) 100 °C

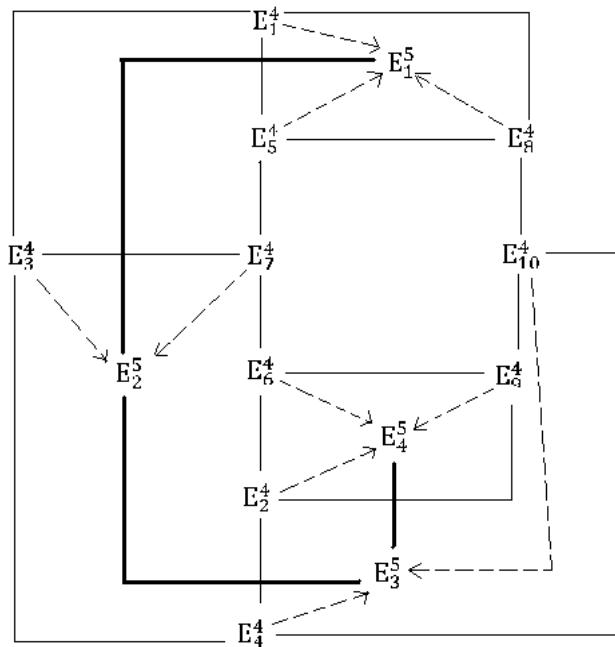
На основе таблицы 2 установлено, что в пятикомпонентной системе $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}, \text{CO}_3^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$ на полигерме уровня четырехкомпонентного состава присутствует 76 нонвариантных точек.

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

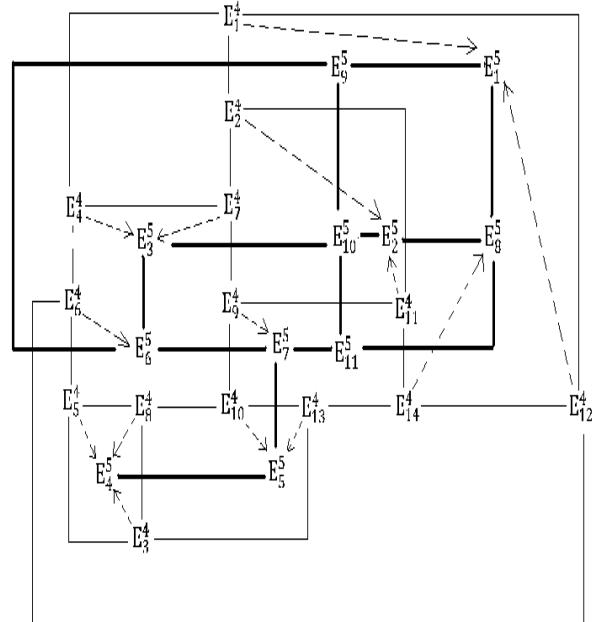
Таблица 3. – Трансляция частичных нонвариантных точек на общий (пятерный) уровень полимеры системы $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}, \text{CO}_3^{2-}, \text{HCO}_3^- \text{-H}_2\text{O}$.

Геометрические трансляционные формы	Формирующиеся нонвариантные точки	Равновесные твёрдые фазы	Вид трансляции
Изотерма 0 $^{\circ}\text{C}$			
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 $^{\circ}\text{C}$			
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 $^{\circ}\text{C}$			
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 $^{\circ}\text{C}$			
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 $^{\circ}\text{C}$			
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

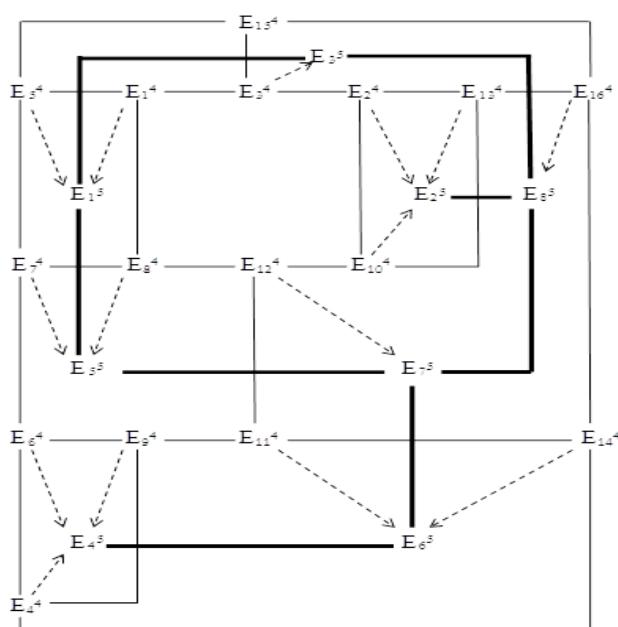
Диаграммы фазового комплекса системы $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}, \text{CO}_3^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$ в интервале температур $0 \div 100^\circ\text{C}$ построенные на основе полученных данных на уровне пятикомпонентного состава, показывают, что: поля кристаллизации, 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.



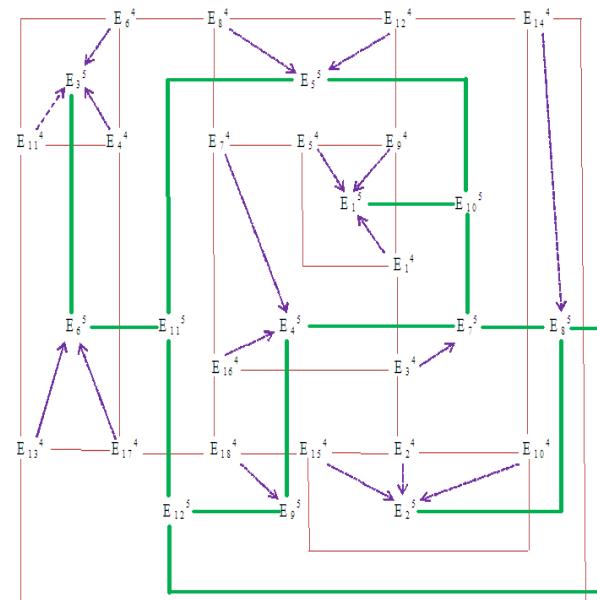
a)



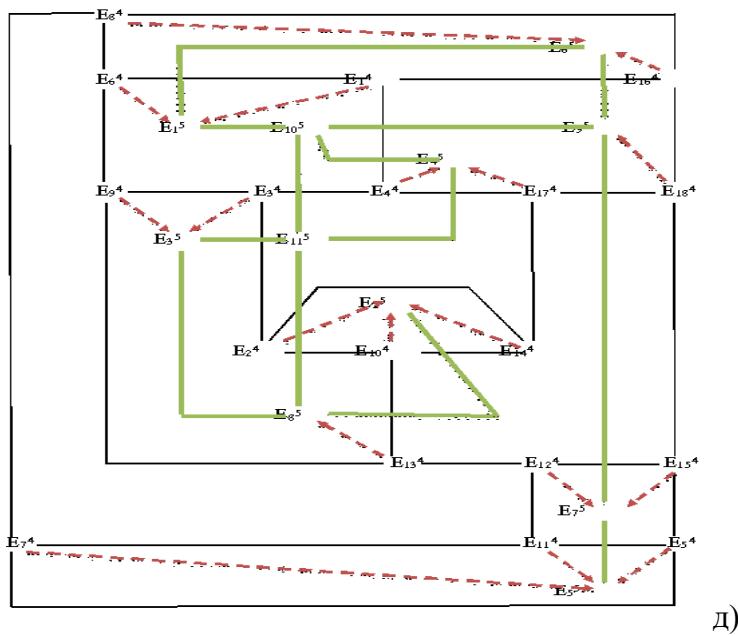
б)



в)



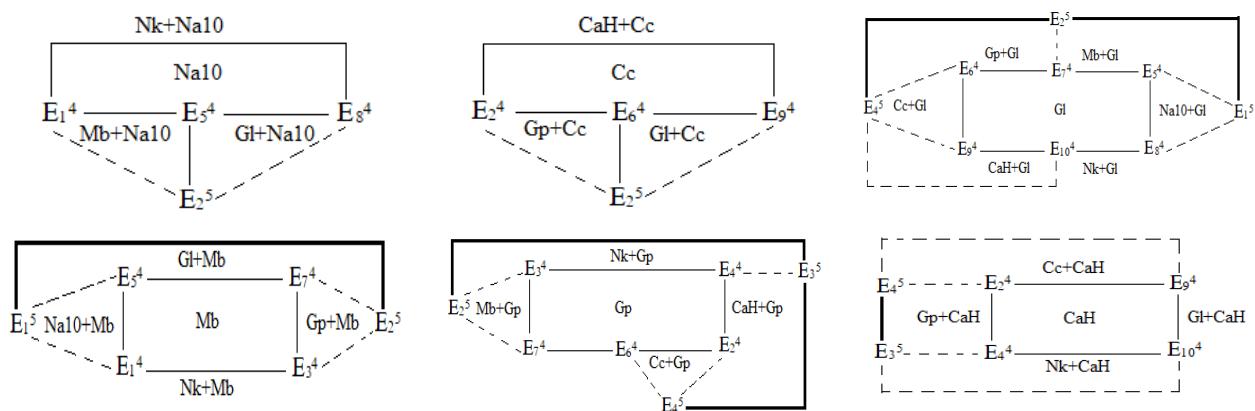
г)



**Рисунок 7. – Политерма диаграммы фазового комплекса четырёх- и пятикомпонентного уровня системы Na^+ , Ca^{2+} || SO_4^{2-} , CO_3^{2-} , HCO_3^- - H_2O в диапазоне температур 0÷100 °C:
а) 0 ; б) 25 ; в) 50 ; г) 75 ; д) 100**

Анализ политермы диаграмм исследуемой системы в диапазоне температур 0÷100 °C показывает, что на отдельных изотермах фазового комплекса наблюдаются фазовые превращения, которые согласно основным законам физико-химического анализа и правилу фаз Гиббса усложняют структуру диаграмм. Например, на изотермической диаграмме системы при 0 °C можно наблюдать, что равновесная фаза гейлюссит (Gl) формирует наибольшее количество полей совместной кристаллизации с другими фазами. Это, соответственно, шесть внешних периметров и пять внутренних полей. Такие явления свидетельствуют о том, что поля кристаллизации данного соединения в указанных условиях занимают большую часть изученной системы.

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^\circ\$ фазового комплекса системы Na^+ , Ca^{2+} || SO_4^{2-} , CO_3^{2-} , HCO_3^- - H_2O (рис. 8) в области парагенезиса одной фазы с другими солями.



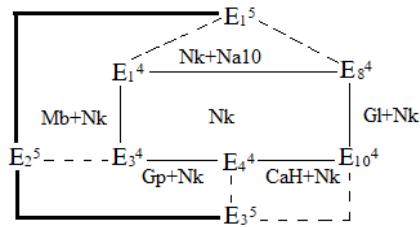


Рисунок 8. – Систем Na^+ , Ca^{2+} || SO_4^{2-} , CO_3^{2-} , HCO_3^- - H_2O при 0°C . Фрагментация диаграммы фазового комплекса осуществлена в области парагенезиса одной фазы с другими солями.

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 Na^+ , Ca^{2+} || SO_4^{2-} , CO_3^{2-} , HCO_3^- - H_2O на четырёхкомпонентном уровне

Экспериментальное исследование химических систем требует проведения и анализа данных по растворимости, например, для каждого 10 % концентрации. Такой подход требует не только большого количества химических реагентов, 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: $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}, \text{CO}_3^{2-}, \text{HCO}_3^-, \text{F}^- - \text{H}_2\text{O}$. 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 °C 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 нонвариантных 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 °C

№ 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 °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
Изотерма 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
Изотерма 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

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.

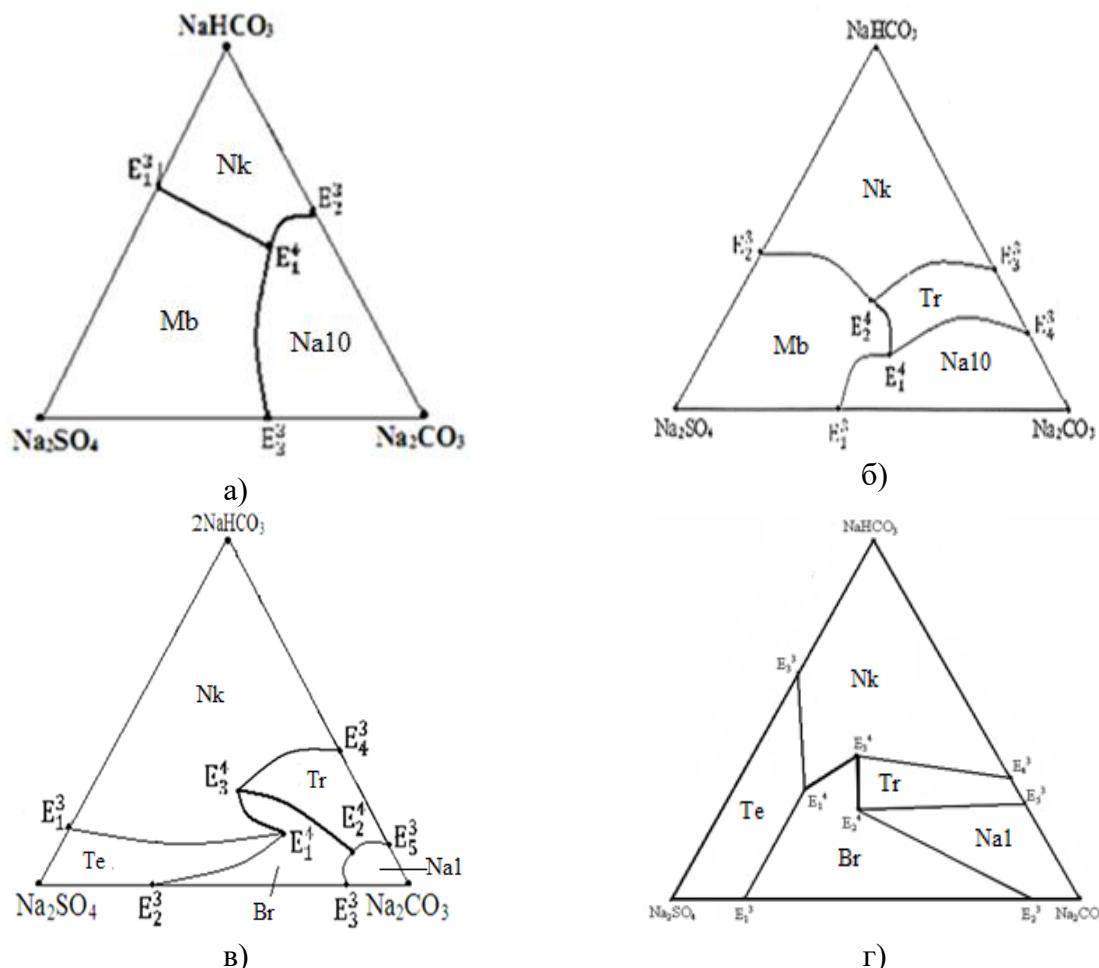


Рисунок 9. – Политермическое сечение безводной проекции диаграммы состояния системы $5\text{Na}^+ - \text{SO}_4^{2-} - \text{CO}_3^{2-} - \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$: а) 0 °C; б) 25 °C; в) 50 °C; д) 75 °C

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 °C к 25 °C в системе фиксируется появление метастабильной или равновесной фазы троны. Дальнейшее повышение температуры в интервале от 25 °C до 50 °C 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 °C они кристаллизуются в виде следующих фаз: $\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (Gp), CaCO_3 (Cc) и $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ (CaH). Для проведения экспериментальных исследований были использованы следующие марки химических реагентов: $\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ «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 °C					
e_1	0.1760	-	-	99.8240	Gp
e_2	-	0.0031	-	99.9960	Cc
e_3	-	-	0.1440	99.8560	CaH
E_1^3	0.0217	0.0014	-	99.9640	Gp+Cc
E_2^3	-	0.0014	0.0830	99.9000	Cc+CaH
E_3^3	0.0217	-	0.0830	99.9850	CaH+Cp
E_1^4	0.0217	0.0014	0.0830	99.8800	Cc+CaH+Gp
Изотерма 25 °C					
e_1	0.2130	-	-	99.7870	Gp
e_2	-	0.0056	-	99.9940	Cc
e_3	-	-	0.0160	99.9840	CaH
E_1^3	0.1750	0.0038	-	99.8210	Gp+Cc
E_2^3	0.1860	-	0.0168	99.7970	Gp+CaH
E_3^3	-	0.0046	0.0179	99.9770	Cc+CaH
E_1^4	0.2180	0.00535	0.0225	99.7540	Gp+Cc+CaH
Изотерма 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
Изотерма 75 °C					
e_1	0.3120	-	-	99.6880	Gp
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 $3\text{Ca}^{2+}\text{-SO}_4^{2-}\text{-CO}_3^{2-}\text{-2HCO}_3^-$ - H_2O в температурном интервале $0 - 75$ $^\circ\text{C}$. Указанная политермическая диаграмма представлена на рисунке 10 в виде изотермических сечений при следующих температурах.

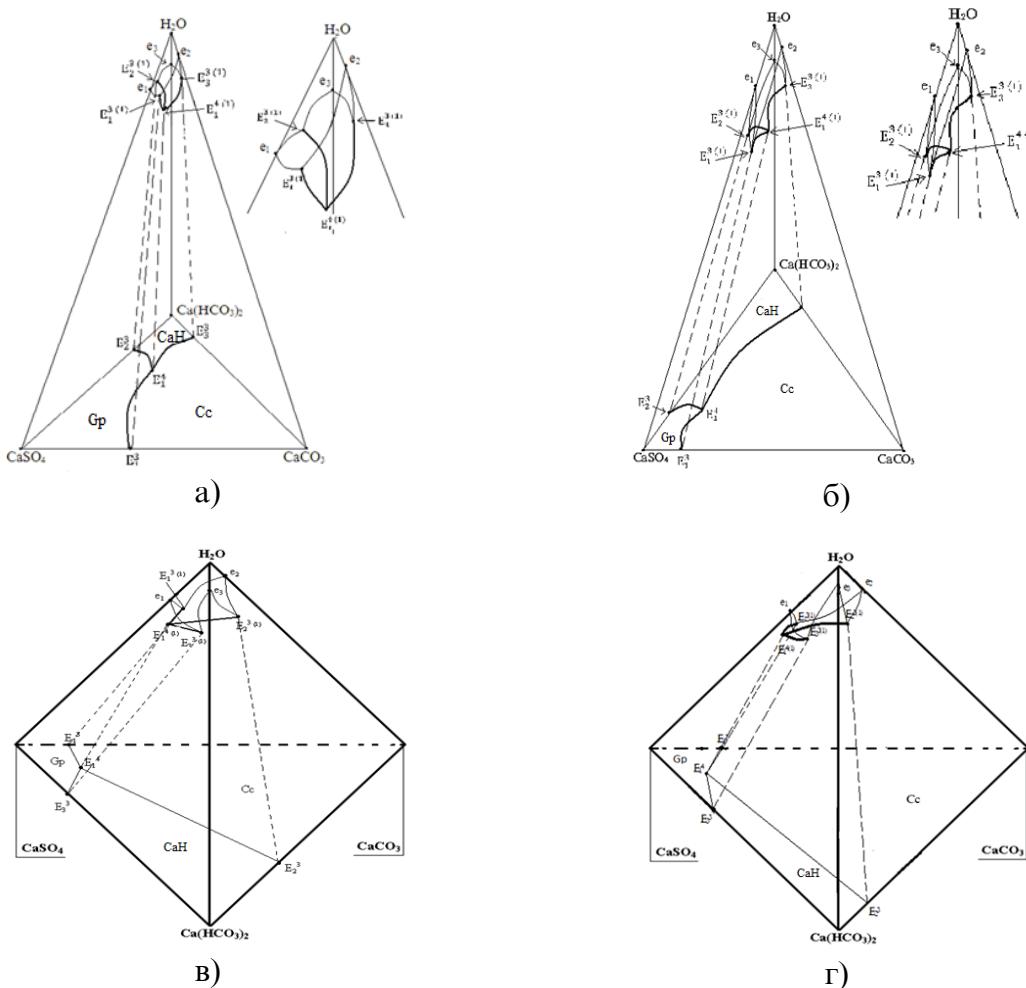


Рисунок 10. – Политермическая диаграмма растворимости системы $3\text{Ca}^{2+}\text{-SO}_4^{2-}\text{-CO}_3^{2-}\text{-2HCO}_3^-$ - H_2O : а) 0 $^\circ\text{C}$; б) 25 $^\circ\text{C}$; в) 50 $^\circ\text{C}$; г) 75 $^\circ\text{C}$

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: $\text{CaSO}_4\text{-CaCO}_3\text{-H}_2\text{O}$ занимает нижнюю часть; $\text{CaSO}_4\text{-CaHCO}_3\text{-H}_2\text{O}$ – правую часть; $\text{CaCO}_3\text{-CaHCO}_3\text{-H}_2\text{O}$ – левую часть.

$\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ расположен в левой части; $\text{CaCO}_3 \cdot \text{Ca}(\text{HCO}_3)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 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 (определенны) на основе данных по растворимости с применением метода масс-центра (центроида). Анализ рис. 10 показывает, что площадь кристаллизации карбоната кальция Cc (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) нонвариантных точках полного состава системы.

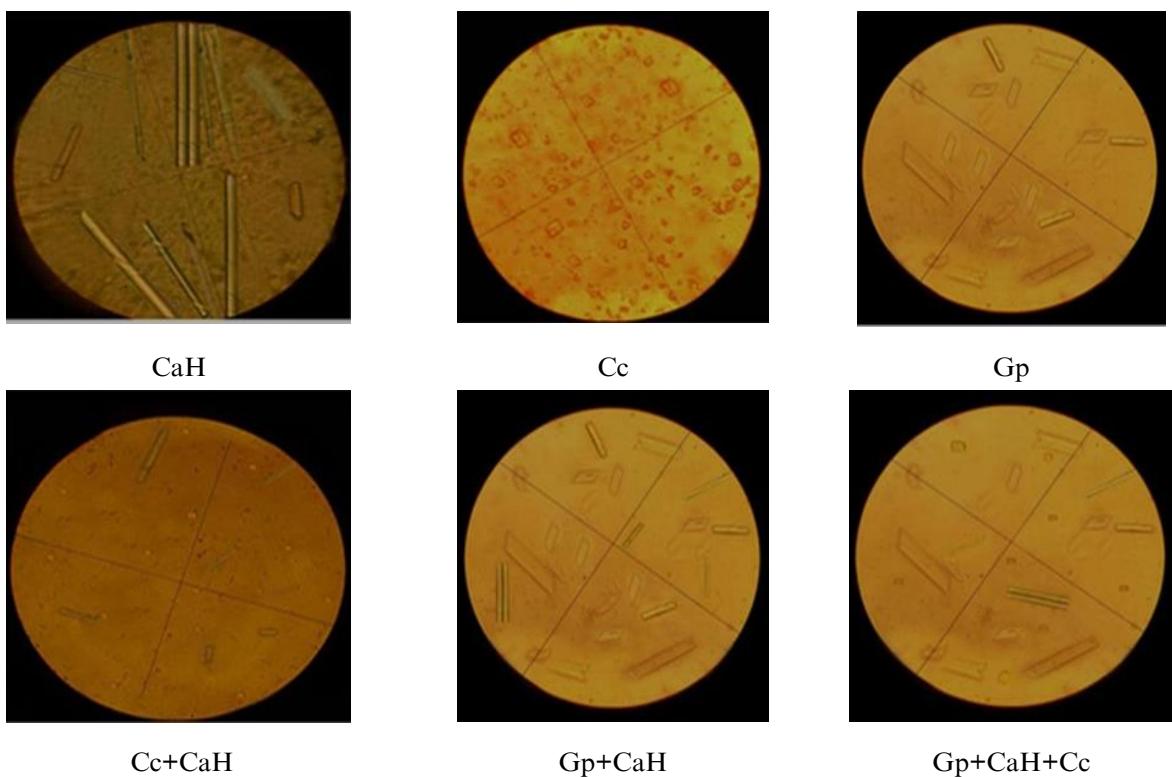


Рисунок 11. – Политермическая серия микрофотографий равновесных твердых фаз системы $3\text{Ca}^{2+}\text{-SO}_4^{2-}\text{-CO}_3^{2-}\text{-2HCO}_3\text{-H}_2\text{O}$

Политерма растворимости в системе Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}, \text{CO}_3^{2-}\text{-H}_2\text{O}$. Равновесные твердые фазы исследуемой системы в температурном диапазоне $0\div100$ $^{\circ}\text{C}$ 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 (Gp); 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); $5\text{CaSO}_4 \cdot \text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ – 5C·Na·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^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, 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 $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}, \text{CO}_3^{2-} - \text{H}_2\text{O}$ (в виде четырехкомпонентной проекции). Безводная проекция построенной диаграммы представлена на рисунке 12 в форме равностороннего четырехугольника.

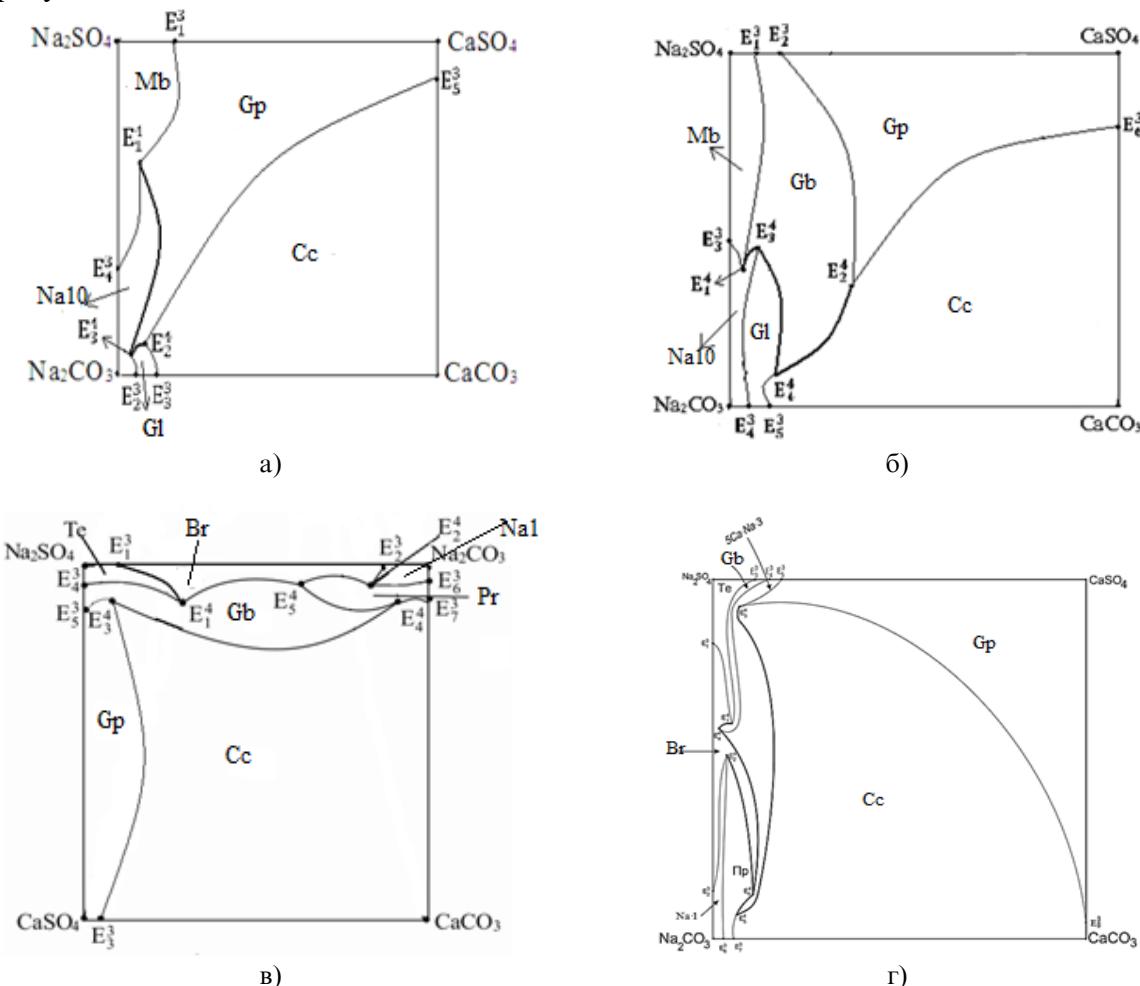
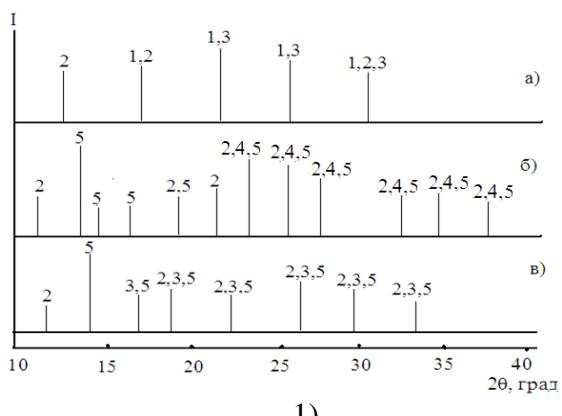
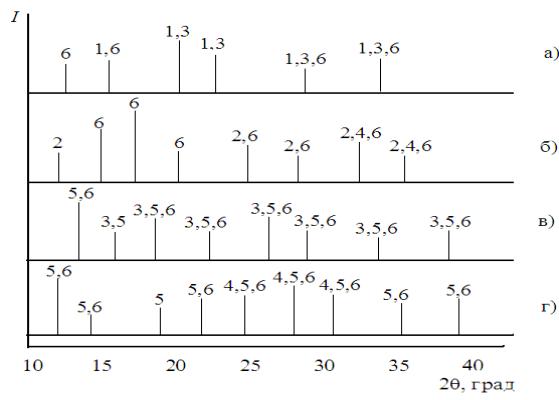


Рисунок 12. – Безводная (солевая) проекция диаграммы состояния системы $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}, \text{CO}_3^{2-} - \text{H}_2\text{O}$, представленная в изотермических режимах: 0; 25; 50 и 75 °C

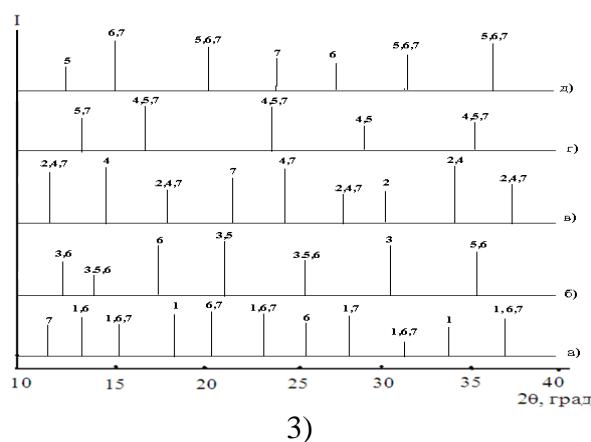
Рисунок 13 демонстрирует рентгенограммы (штрихрентгенограммы) равновесных твердых фаз, полученные при экспериментальных изотермах системы $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}, \text{CO}_3^{2-} - \text{H}_2\text{O}$: 1) при 0, 2) при 25, 3) при 50 °C. Проведенный рентгенофазовый анализ (РФА) также подтверждает, что в точках, соответствующих нонвариантным равновесиям на четырехфазном уровне (тетраточки), сосуществуют (находятся в равновесии) три твердые фазы.



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



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



Растворимость системы $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$. При изотермических режимах 0 и 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 - нахолит (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) и $\text{CaSO}_4 \cdot \text{Na}_2\text{SO}_4$ - глауберит (Gb) осаждаются как равновесные фазы. Для реализации поставленных экспериментальных задач был использован нижеперечисленный перечень реагентов, 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 нонвариантных точках исследуемой системы. Эти данные охватывают уровень трехкомпонентного и четырехкомпонентного составов.

Таблица 8. – Данные о растворимости в системе $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$

№ точки	Состав жидкой фазы, мас. %					Состав фазового осадка
	Na_2SO_4	NaHCO_3	CaSO_4	$\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$	H_2O	
Температура 0 °C						
E_1^3	2.570	5.820	–	–	91.610	$\text{Mb}+\text{Nk}$
E_2^3	4.340	–	0.196	–	95.464	$\text{Mb}+\text{Gp}$
E_3^3	–	–	0.217	0.083	99.700	$\text{Gp}+\text{CaH}$
E_1^4	3.430	5.220	0.326	–	91.024	$\text{Mb}+\text{Gp}+\text{Nk}$
E_2^4	–	4.865	0.131	0.153	94.851	$\text{Gp}+\text{Nk}+\text{CaH}$
Температура 25 °C						
E_1^3	20.680	4.160	–	–	75,160	$\text{Nk}+\text{Mb}$

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^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, $\text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$ при изотерме 0 и 25 °C. Эти диаграммы визуализированы на рисунке 14.

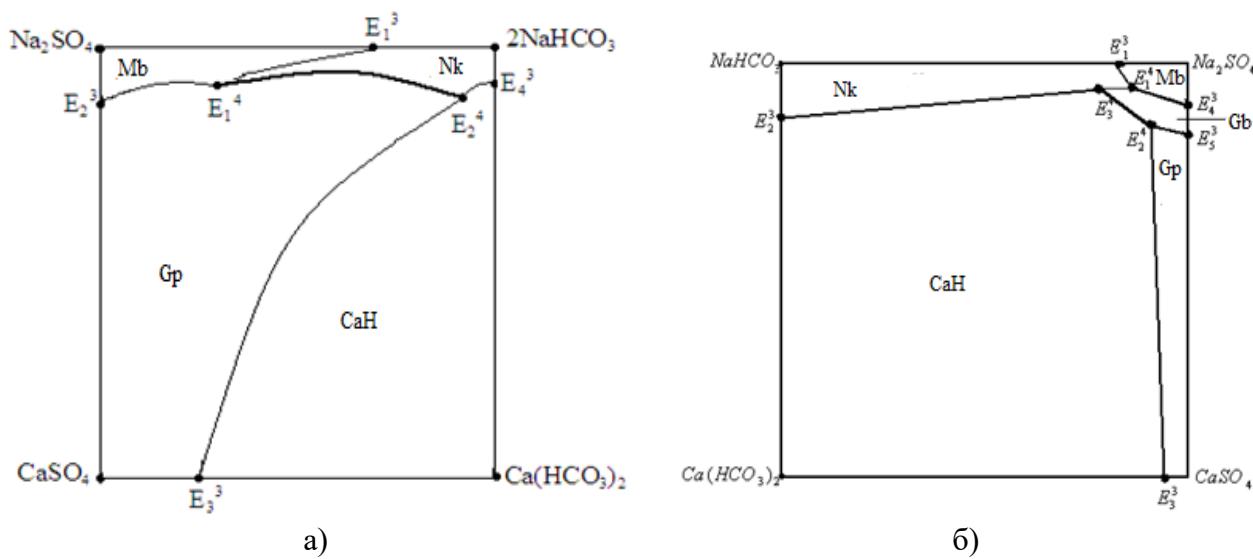


Рисунок 14. – Безводная (солевая) проекция диаграммы растворимости системы Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, $\text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$ при следующих изотермических условиях:
а) при 0 и б) 25 °C

Исследование растворимости в системе Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, $\text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$. В заданных условиях равновесными твердыми фазами, способными кристаллизоваться в исследуемой системе, являются: CaCO_3 - кальцит (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 - nahcolит (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 нонвариантных 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_2CO_3	NaHCO_3	CaCO_3	$\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$	H_2O	
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^+ , $\text{Ca}^{2+}||\text{CO}_3^{2-}$, 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°C . 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 $\text{Na}_{10+\text{Tr}}$; 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 $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+} \parallel \text{CO}_3^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$, которая является четырехкомпонентной. На рисунке 15 представлена полная водно-солевая прекция этой диаграммы.

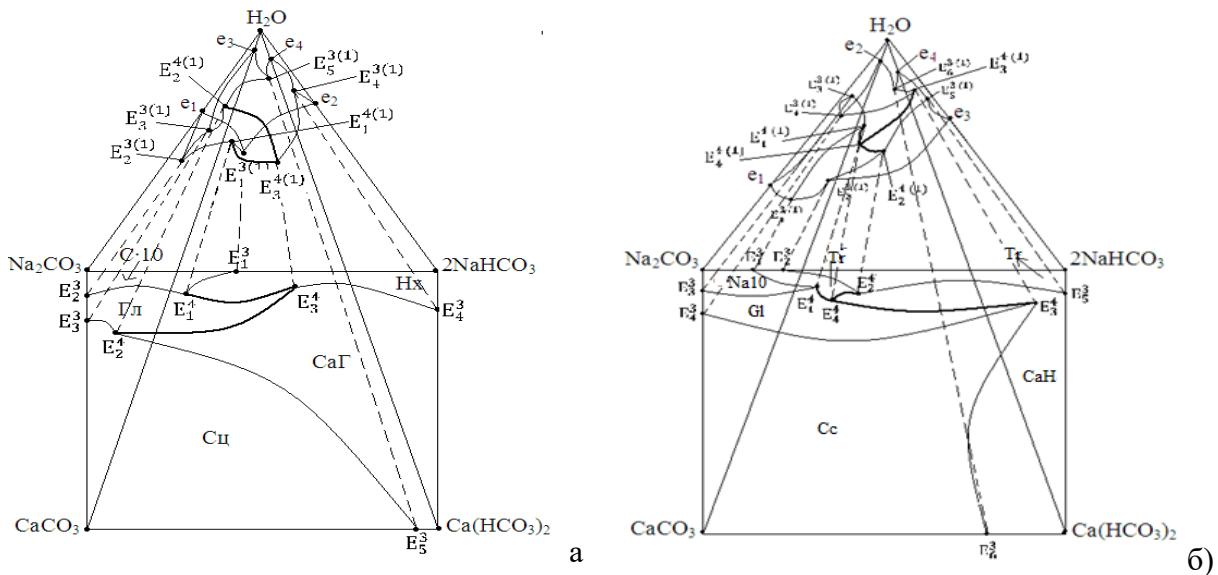


Рисунок 15. – Диаграмма растворимости системы $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+} \parallel \text{CO}_3^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$:
а) при 0 °C и б) при 25 °C.

Концентрационные параметры равновесных твердых фаз в многокомпонентной системе $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+} \parallel \text{CO}_3^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$, которая является для технологической разработки утилизации жидких отходов алюминиевого производства фундаментальной основой.

Многокомпонентная система $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+} \parallel \text{CO}_3^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$ и её нонвариантное равновесие. Концентрация равновесной жидкой фазы в нонвариантной 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 нонвариантных точках фиксироваться

множество равновесных насыщенных растворов. Причем, содержание в них компонентов также варьируется. Например, для одной из нонвариантных точек пятикомпонентной системы Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{CO}_3^{2-}$, HCO_3^- - H_2O при температуре 0 °C было установлено два разных состава равновесной жидкой фазы (табл. 10).

Таблица 10. – Данные о растворимости в системе Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{CO}_3^{2-}$, HCO_3^- - H_2O при 0 °C

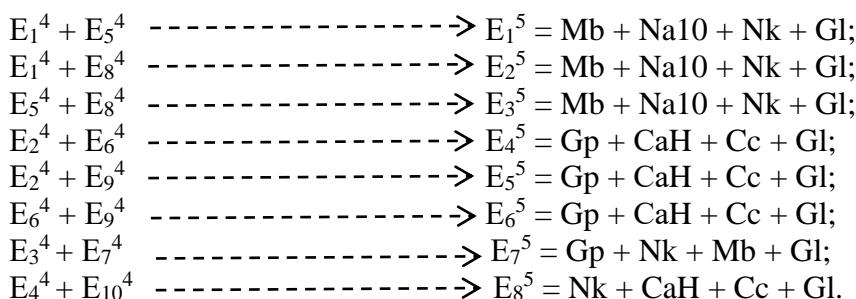
Пример	Состав насыщенного раствора, мас. %							Состав твёрдой фазы
	Na_2SO_4	NaHCO_3	CaSO_4	Na_2CO_3	CaCO_3	$\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$	H_2O	
СЖО	5.2800	4.5100	-	5.7800	0.0054	-	84.4246	$\text{Nk}+\text{Mb}+\text{Na10}+\text{Gl}$
Эксп.	5.3700	4.6900	-	5.7600	0.0061	-	84.1739	$\text{Nk}+\text{Mb}+\text{Na10}+\text{Gl}$

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 нонвариантной 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 Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, CO_3^{2-} , HCO_3^- - H_2O при 0 °C были идентифицированы 4 нонвариантные точки со следующим составом равновесных твердых фаз: $E_1^5 = \text{Mb} + \text{Na10} + \text{Nk} + \text{Gl}$; $E_2^5 = \text{Gp} + \text{CaH} + \text{Cc} + \text{Gl}$; $E_3^5 = \text{Gp} + \text{Nk} + \text{Mb} + \text{Gl}$; $E_4^5 = \text{Nk} + \text{CaH} + \text{Cc} + \text{Gl}$. При этом, для нонвариантной точки 1 эмпирически были обнаружены два состава насыщенного раствора, тогда как для двух других точек было зафиксировано по одному составу.

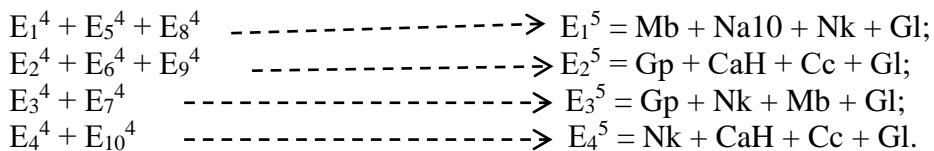
Сведения, полученные с использованием метода трансляции, подтверждают существование четырех нонвариантных точек для данной системы, а также предоставляют теоретическое обоснование наличию различных составов насыщенного раствора для одной и той же точки. Этот факт может быть верифицирован посредством анализа путей формирования нонвариантных точек системы Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, CO_3^{2-} , HCO_3^- - H_2O при 0 °C.

Трансляция четырехкомпонентных нонвариантных 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 нонвариантных точек:



Как показал анализ, из восьми теоретически возможных пятифазных нонвариантных точек, возникающих в результате трансляции E_1^5 , E_2^5 , E_3^5 , E_4^5 , E_5^5 , 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 нонвариантных точек. Поэтому, для системы Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, CO_3^{2-} , HCO_3^- - H_2O , которая является пятикомпонентной, при 0 °C

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



На основании вышеизложенного представляется возможным прогнозировать, что вариативность состава насыщенного раствора в нонвариантных 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 нонвариантных точек E_1^5 и E_2^5 для водно-солевой системы $Na^+, Ca^{2+} \parallel SO_4^{2-}, CO_3^{2-}, HCO_3^- - H_2O$ при $0^{\circ}C$ может быть графически интерпретирован следующим образом (рис. 16).

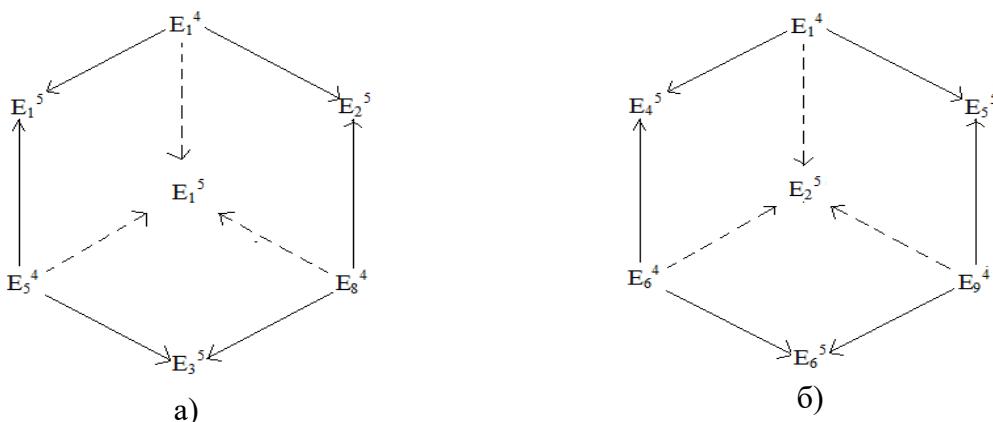


Рисунок 16. – Система $Na^+, Ca^{2+} \parallel SO_4^{2-}, CO_3^{2-}, HCO_3^- - H_2O$ и схема вариантов образования в ней при $0^{\circ}C$ нонвариантных точек при трансляции четырехфазных точек на поверхность пятикомпонентного состава с осадками: а) $Mb+Na10+Nk+Gl$; б) $Gp+CaH+Cc+Gl$

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

Состав равновесной жидкой фазы нонвариантной точки этой геометрической точки может быть ассоциирована различными путями. Эта гипотеза доказывается не только растворимостью пятикомпонентной системы $Na^+, Ca^{2+} \parallel SO_4^{2-}, CO_3^{2-}, HCO_3^- - H_2O$ при $0^{\circ}C$. В пользу указанной гипотезы выступают результаты изучения многокомпонентных систем и других авторов. Отличающиеся химические составы насыщенного раствора приведенной выше системы при $0^{\circ}C$ (табл. 10), отвечающие одному и тому же составу твердых фаз нонвариантной точки, конечно же могут быть интерпретированы последовательным внесением определенных солей в исходную смесь. Такой подход необходим для соответствия использованных вариантов трансляции четырехфазных нонвариантных точек на поверхность пятикомпонентного состава.

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

быть отражено как в форме точки (единственный вариант образования), так и в виде геометрического выражения точки (квазиточки). 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.

$$\begin{array}{llll}
 E_1^4 + E_5^4 + E_9^4 & E_1^5 = \text{Te} + \text{Nk} + \text{Br} + \text{Gb}; & E_2^4 + E_{10}^4 + E_{15}^4 & E_2^5 = \text{Na1} + \text{Tr} + \text{Br} + \text{Pr}; \\
 E_4^4 + E_6^4 + E_{11}^4 & E_3^5 = \text{Gp} + \text{CaH} + \text{Cc} + 5\text{Ca} \cdot \text{Na} \cdot 3; & E_7^4 + E_{16}^4 & E_4^5 = \text{Tr} + \text{Nk} + \text{Br} + \text{CaH}; \\
 E_8^4 + E_{12}^4 & E_5^5 = \text{CaH} + \text{Gb} + 5\text{Ca} \cdot \text{Na} \cdot 3 + \text{Br}; & E_{13}^4 + E_{17}^4 & E_6^5 = \text{Pr} + \text{CaH} + 5\text{Ca} \cdot \text{Na} \cdot 3 + \text{Cc}; \\
 E_3^4 + 5\text{Ca} \cdot \text{Na} \cdot 3 & E_7^5 = \text{Nk} + \text{Tr} + 5\text{Ca} \cdot \text{Na} \cdot 3 + \text{Br}; & E_{14}^4 + \text{Tr} & E_8^5 = \text{Br} + \text{Pr} + 5\text{Ca} \cdot \text{Na} \cdot 3 + \text{Tr}; \\
 E_{18}^4 + \text{Br} & E_9^5 = \text{Tr} + \text{Pr} + \text{CaH} + \text{Br}. & &
 \end{array}$$

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

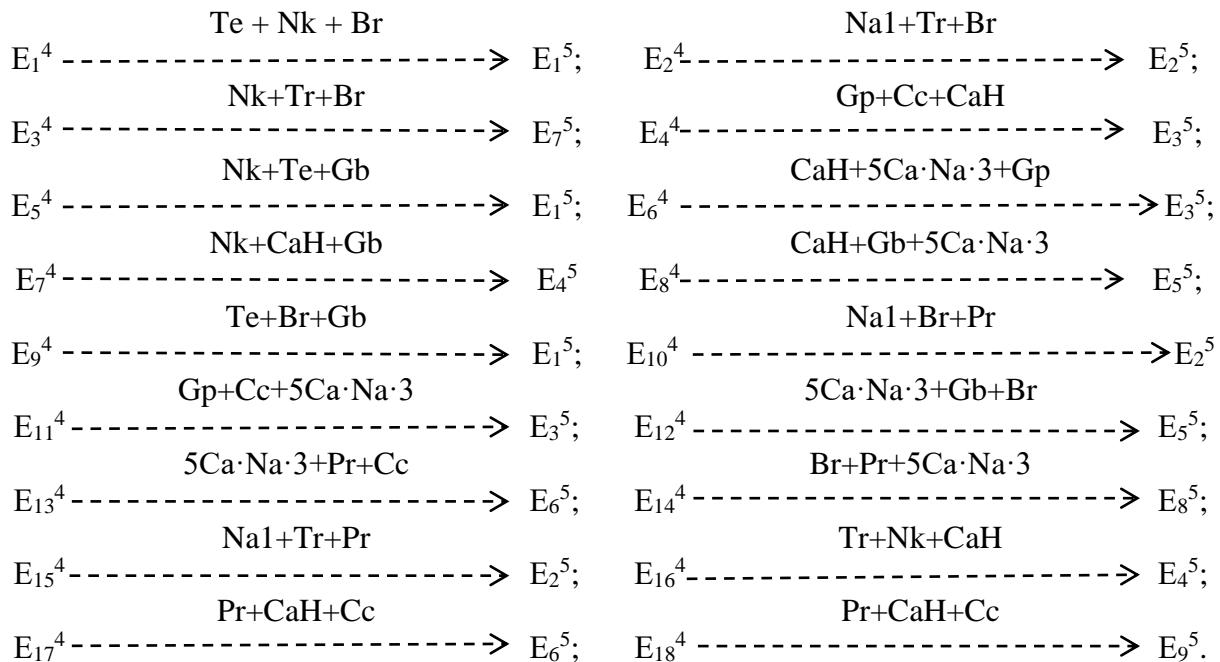
Моновариантные линии (рис. 7, г), дифференцируются как по своей геометрической фигуре, так и равновесному составу твердых фаз. Если моновариантные линии проходят между четырехфазными нонвариантными точками, им свойственно существование такой пары твердых фаз:

$$\begin{array}{llllll}
 E_1^4 & E_3^4 = \text{Nk} + \text{Br}; & E_7^4 & E_8^4 = \text{CaH} + \text{Gb}; & E_1^4 & E_5^4 = \text{Nk} + \text{Te}; \\
 E_7^4 & E_{16}^4 = \text{Nk} + \text{CaH}; & E_1^4 & E_9^4 = \text{Te} + \text{Br}; & E_8^4 & E_{12}^4 = \text{Gb} + 5\text{Ca} \cdot \text{Na} \cdot 3; \\
 E_2^4 & E_3^4 = \text{Tr} + \text{Br}; & E_9^4 & E_{12}^4 = \text{Gb} + \text{Br}; & E_2^4 & E_{10}^4 = \text{Na1} + \text{Br}; \\
 E_{10}^4 & E_{14}^4 = \text{Br} + \text{Pr}; & E_2^4 & E_{15}^4 = \text{Na1} + \text{Tr}; & E_{10}^4 & E_{15}^4 = \text{Na1} + \text{Pr}; \\
 E_3^4 & E_{16}^4 = \text{Nk} + \text{Tr}; & E_{11}^4 & E_{13}^4 = \text{Cc} + 5\text{Ca} \cdot \text{Na} \cdot 3; & E_4^4 & E_6^4 = \text{Gp} + \text{CaH}; \\
 E_{12}^4 & E_{14}^4 = \text{Br} + 5\text{Ca} \cdot \text{Na} \cdot 3; & E_{13}^4 & E_{14}^4 = \text{Pr} + 5\text{Ca} \cdot \text{Na} \cdot 3; & E_4^4 & E_{11}^4 = \text{Gp} + \text{Cc}; \\
 E_4^4 & E_{17}^4 = \text{CaH} + \text{Cc}; & E_{13}^4 & E_{17}^4 = \text{Pr} + \text{Cc}; & E_5^4 & E_7^4 = \text{Nk} + \text{Gb}; \\
 E_{15}^4 & E_{18}^4 = \text{Tr} + \text{Pr}; & E_5^4 & E_9^4 = \text{Te} + \text{Gb}; & E_{16}^4 & E_{18}^4 = \text{Tr} + \text{CaH}; \\
 E_6^4 & E_8^4 = \text{CaH} + 5\text{Ca} \cdot \text{Na} \cdot 3; & E_{17}^4 & E_{18}^4 = \text{Pr} + \text{CaH}; & E_6^4 & E_{11}^4 = \text{Gp} + 5\text{Ca} \cdot \text{Na} \cdot 3;
 \end{array}$$

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

E_1^5	$E_{10}^5 = Nk + Br + Gb;$	E_5^5	$E_{11}^5 = CaH + 5Ca \cdot Na \cdot 3 + Gb;$
E_2^5	$E_8^5 = Tr + Pr + Br;$	E_6^5	$E_{11}^5 = CaH + 5Ca \cdot Na \cdot 3 + Pr;$
E_3^5	$E_6^5 = CaH + Cc + 5Ca \cdot Na \cdot 3;$	E_7^5	$E_8^5 = Br + Tr + 5Ca \cdot Na \cdot 3;$
E_4^5	$E_7^5 = Tr + Nk + Br;$	E_7^5	$E_{10}^5 = Nk + Br + 5Ca \cdot Na \cdot 3;$
E_4^5	$E_9^5 = Tr + CaH + Br;$	E_8^5	$E_{12}^5 = Pr + 5Ca \cdot Na \cdot 3 + Tr;$
E_5^5	$E_{10}^5 = Gb + 5Ca \cdot Na \cdot 3 + Br;$	E_9^5	$E_{12}^5 = Pr + Tr + CaH;$
		E_{11}^5	$E_{12}^5 = CaH + 5Ca \cdot Na \cdot 3 + Pr.$

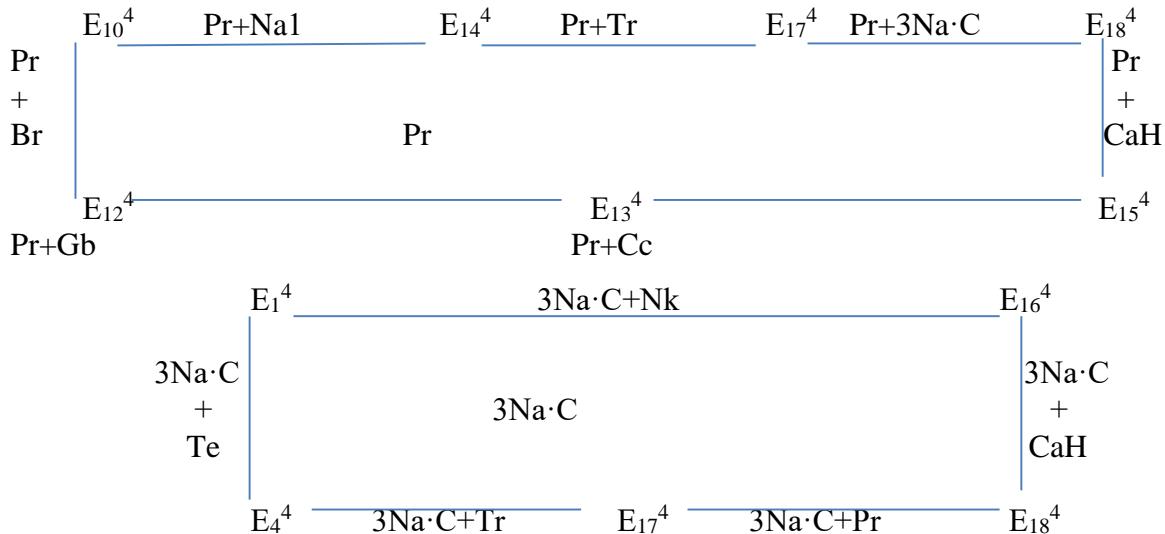
Формирование другого вида моновариантных линий связано с трансформацией нонвариантных точек четырехкомпонентного состава в моновариантные линии на поверхность пятикомпонентного. Если в начальные четырехкомпонентные подсистемы добавить пятый компонент, то линии возникают на уровне пятикомпонентного состава. Нами установлено, что четырехфазные нонвариантные точки четырехфазных четырехкомпонентных подсистем при трансляции на уровень пятикомпонентного состава превращаются в моновариантные линии пятифазных нонвариантных 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 нонвариантные точки; 13 моновариантных линий, пролегающих между пятерными нонвариантными точками (что указывает на специфику фазового генезиса или альтернативные траектории формирования равновесий в данных узлах); 18 моновариантных линий, обеспечивающих сопряжение между четверьми и пятерными нонвариантными точками. Данные количественные характеристики определяют геометрическую структуру фазового пространства и позволяют прогнозировать поведение системы при варьировании компонентного состава.

Дивариантное равновесие в многокомпонентной системе $Na^+, Ca^{2+} \parallel SO_4^{2-}, CO_3^{2-}, HCO_3^- - H_2O$. Вполне естественно, что чем больше нонвариантных 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 нонвариантных точек и 7 моновариантных линий, в то время как в ограничении дивариантного поля с равновесной

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

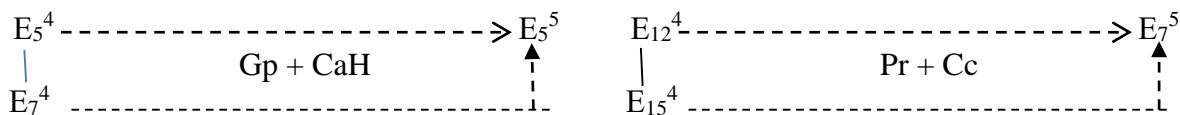


Этот факт демонстрирует, что первое дивариантное поле в указанных условиях занимает больший сегмент системы по сравнению со вторым дивариантным полем.

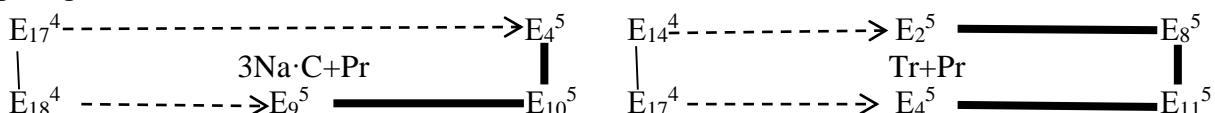
При переходе системы с четырехкомпонентного на пятикомпонентный уровень (путем добавления пятого компонента в одну из пяти исходных четырехкомпонентных подсистем) происходит трансформация геометрических форм четырехкомпонентных систем с их последующей трансляцией на поверхность пятикомпонентного состава. 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 нонвариантными 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).

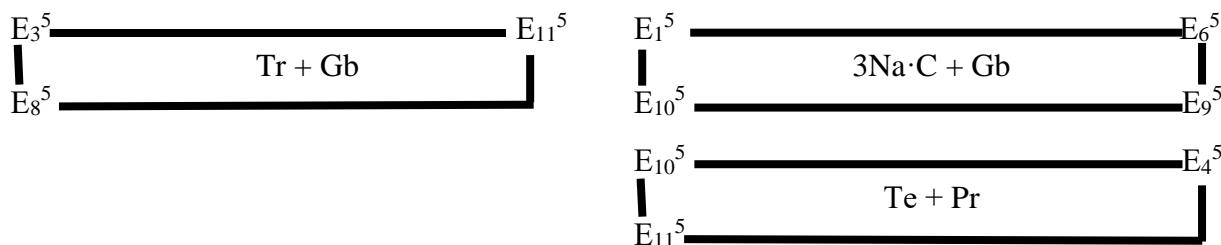
а) Пятифазные нонвариантные точки - моновариантные линии, проходящие между ними, которые, в свою очередь, возникли в результате трансляции четырехфазных нонвариантных точек. Пример:



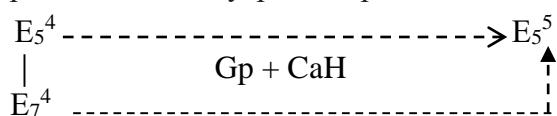
б) Пятифазные нонвариантные точки - моновариантные линии, проходящие между этими точками, возникшие в результате трансляции четырехфазных нонвариантных точек. Пример:



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 нонвариантными 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 figurативная 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:

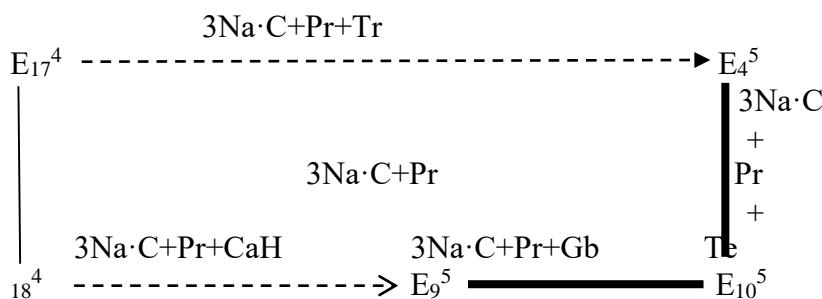


Если figurативная точка находится в дивариантном поле с Gp (гипс) в качестве единственной твердой фазы, то для продолжения пути кристаллизации существуют две возможности, отличающиеся по числу моновариантных линий на уровне пятикомпонентного состава, которые ограничивают это поле:

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 Сс (кальцит).

Впоследствии путь кристаллизации завершается в нонвариантной точке E_5^5 с сосуществующими равновесными твердыми фазами Gp+Cc+CaH+Gb.



При локализации figurативной 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 пятерных нонвариантных 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 нонвариантной 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 финишируется в нонвариантной точке E_9^5 , характеризующейся равновесием твердых фаз $3\text{Na}\cdot\text{C}+\text{Pr}+\text{CaH}$.

При выходе на моновариантные кривые $E_9^5E_{10}^5$ и $E_4^5E_{10}^5$ в процессе кристаллизации дальнейшая эволюция системы детерминируется 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 нонвариантной точки E_9^5 . По достижении данного состояния устанавливается равновесие между следующими твердыми фазами: $3\text{Na}\cdot\text{C}+\text{Pr}+\text{CaH}+\text{Gb}$. В случае, если при выходе на линию $E_4^5E_{10}^5$ фиксируется повышение концентрации системы за счет тенардита, траектория кристаллизации направляется к шестикомпонентной нонвариантной точке E_{10}^5 . Финальное равновесное состояние в этой точке характеризуется существованием твердых фаз $3\text{Na}\cdot\text{C}+\text{Pr}+\text{CaH}+\text{Gb}$.

Растворимость пятикомпонентной взаимной системы Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, CO_3^{2-} , HCO_3^- - H_2O при 0°C . Установлено, что в указанной системе при приведенной температуре в осадок выпадают следующие равновесные твердые фазы: $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ - 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 - кальцит (Cc); $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ - декагидрат карбоната натрия (Na10); NaHCO_3 - нахолит (Nk); $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ - гидрокарбонат кальция (CaH). В таблице 11 приведены определенные нами данные о растворимости индивидуальных соединений и нонвариантных точек исследуемой системы на уровнях трехкомпонентного, четырехкомпонентного и пятикомпонентного составов.

Таблица 11. – Растворимость нонвариантных точек системы Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, CO_3^{2-} , HCO_3^- - H_2O при 0°C

№ точки	Состав жидкой фазы, мас.%						Состав фазового осадка
	Na_2SO_4	NaHCO_3	CaSO_4	Na_2CO_3	CaCO_3	$\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$	
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 таблица 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 $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}, \text{CO}_3^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$ при температуре 0 °C. Эта диаграмма представлена на рисунке 17.

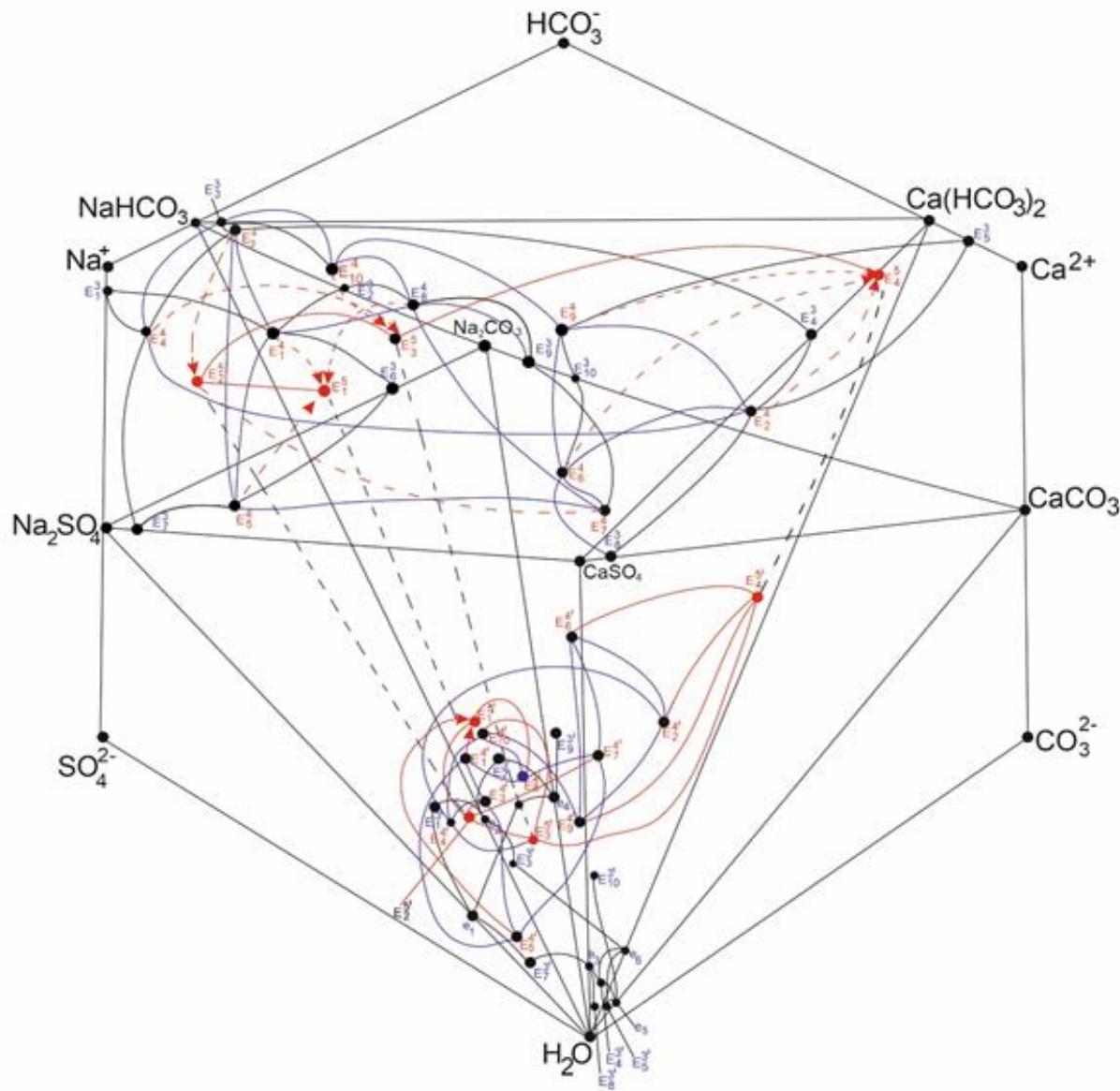


Рисунок 17. – Диаграмма растворимости системы $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}, \text{CO}_3^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$ при 0 °C

Методы получения индивидуальных фаз из жидкых 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 Na^+ , Ca^{2+} || CO_3^{2-} , HCO_3^- - H_2O видно, что при 0 °С (рисунок 15, а) декагидрат карбоната натрия граничит с фазами гейлюссита и он обладает способностью к соосаждению в нонвариантных 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 Na^+ , Ca^{2+} || CO_3^{2-} , HCO_3^- - H_2O 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 нонвариантных 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, троной, 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 $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+} \parallel \text{CO}_3^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$.

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 $5\text{Na}^+ \cdot \text{SO}_4^{2-} \cdot \text{CO}_3^{2-} \cdot \text{HCO}_3^- \cdot \text{H}_2\text{O}$ видно, что при 0 °С (рис. 9, а) нахколит граничит с фазами мирабилита и декагидрата карбоната натрия и способен к совместному осаждению в нонвариантных 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 $\text{Na}_2\text{SO}_4 \text{--} \text{Na}_2\text{CO}_3 \text{--} \text{NaHCO}_3 \text{--} \text{H}_2\text{O}$ 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 нонвариантных 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 сульфати натрий ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$), 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 °C 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 °C 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 °C 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 °C (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.

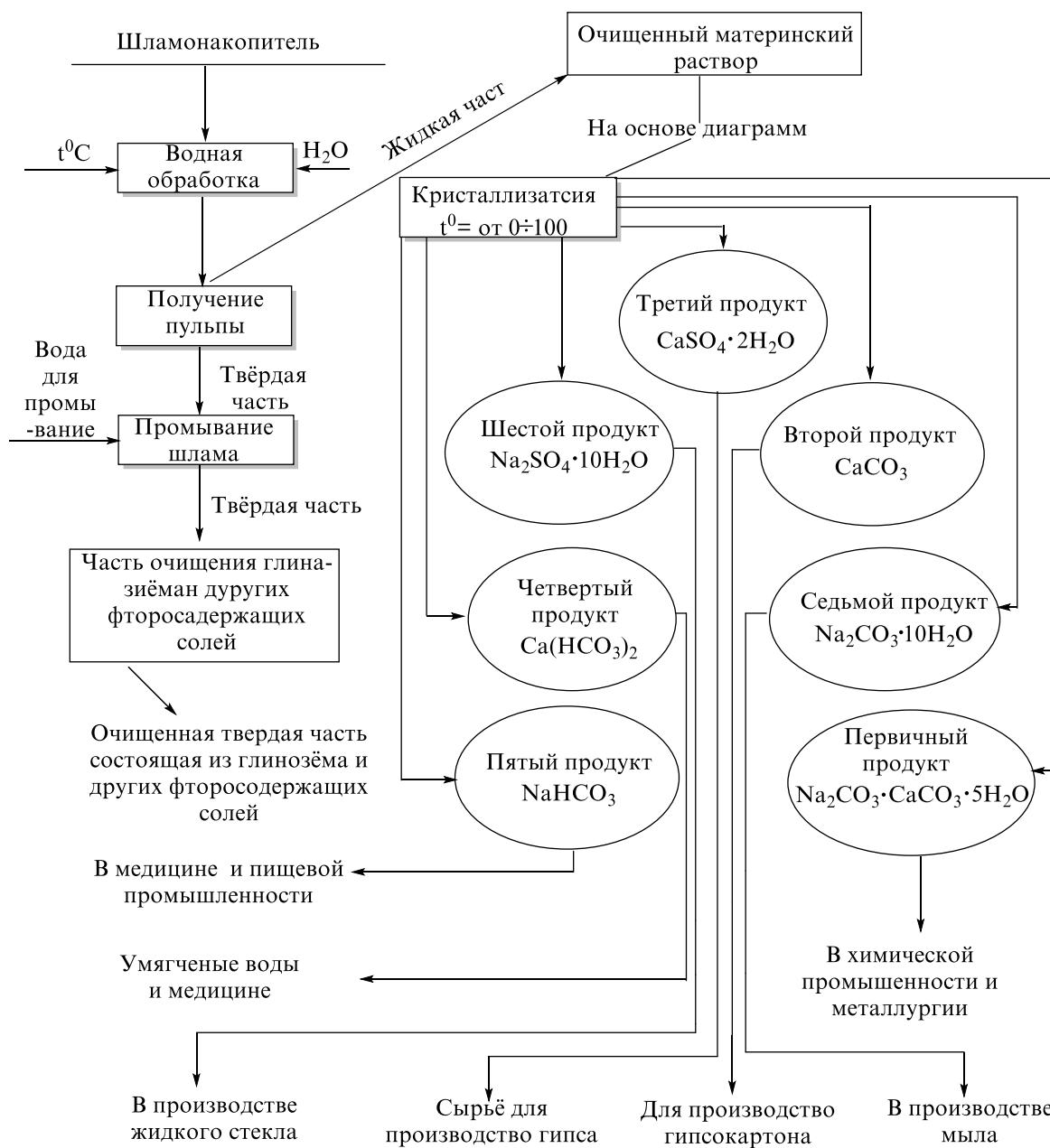


Рисунок 18. – Принципиальная технологическая схема процесса кристаллизации отдельных твердых фаз в системе $\text{H}_2\text{O}-5\text{Na}^+-\text{SO}_4^{2-}-\text{CO}_3^{2-}-\text{HCO}_3^-$

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-А], [13-А], [15-А], [19-А], [29-А], [30-А], [36-А], [37-А], [38-А], [46-А], [68-А], [82-А], [85-А], [86-А], [99-А], [101-А].

2. Применение данного метода доказано получением достоверных теоретических и экспериментальных результатов 25 изотерм фазовых комплексов четырехкомпонентных систем: $5\text{Na}^+-\text{SO}_4^{2-}-\text{CO}_3^{2-}-\text{HCO}_3^--\text{H}_2\text{O}$; $3\text{Ca}^{2+}-\text{SO}_4^{2-}-\text{CO}_3^{2-}-2\text{HCO}_3^--\text{H}_2\text{O}$; $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}, \text{CO}_3^{2-}-\text{H}_2\text{O}$; $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}, \text{HCO}_3^--\text{H}_2\text{O}$; $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+} \parallel \text{CO}_3^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$ 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-А], [6-А], [7-А], [9-А], [10-А], [12-А], [47-А], [50-А], [51-А], [55-А], [57-А], [63-А], [64-А], [70-А], [80-А], [81-А], [90-А], [93-А], [96-А], [97-А].

3. Впервые экспериментально выявлено, что увеличение числа геометрических форм с повышением температуры от 0 до 100 $^{\circ}\text{C}$ 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-А], [31-А], [32-А], [39-А], [40-А], [41-А], [49-А], [54-А], [67-А], [74-А], [83-А], [92-А], [102-А].

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-А], [35-А], [43-А], [44-А], [45-А], [46-А], [53-А], [84-А], [87-А], [100-А], [103-А], [112-А].

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

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-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. Методом растворимости были исследованы и построены диаграммы состояния пяти следующих систем в интервале 0-100 $^{\circ}\text{C}$: $5\text{Na}^+ - \text{SO}_4^{2-} - \text{CO}_3^{2-} - \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$; $3\text{Ca}^{2+} - \text{SO}_4^{2-} - \text{CO}_3^{2-} - 2\text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$; $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}, \text{CO}_3^{2-} - \text{H}_2\text{O}$; $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$; $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+} \parallel \text{CO}_3^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$, 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 $^{\circ}\text{C}$. Достоверность полученных экспериментальных данных подтверждена методами химического, кристаллооптического и рентгенофазового анализов и полностью согласуются с данными, полученными методом трансляции [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].

**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 $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}, \text{CO}_3^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$ (пятикомпонентная) является одной из составной части сложной шестикомпонентной системы $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}, \text{CO}_3^{2-}, \text{HCO}_3^-, \text{F}^- - \text{H}_2\text{O}$. Условия утилизации жидких отходов алюминивого 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 $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}, \text{CO}_3^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$ 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, нахолита и виломита из жидких отходов алюминиевого производства.

**ПЕРЕЧЕНЬ НАУЧНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЬЯ
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 $\text{Na}, \text{Ca} \parallel \text{SO}_4, \text{CO}_3 - \text{H}_2\text{O}$ при $0 \div 100 {}^\circ\text{C}$ / 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 $50 {}^\circ\text{C}$ / Л. Солиев, Ш.Х. Авлоев, М.Т. Жумаев // Паёми донишгоҳи омӯзгорӣ. Бахши илмҳои табии. -2009. -№ 2(34). -С.155-157.

[5-М]. Солиев, Л. Фазовые равновесия системы $\text{Na}, \text{Ca} \parallel \text{SO}_4, \text{HCO}_3 - \text{H}_2\text{O}$ при $25 {}^\circ\text{C}$ / 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 // CO₃ - HCO₃ - H₂O 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 // CO₃, HCO₃ - H₂O 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 // HCO₃, CO₃ - H₂O 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 CaSO₄-CaCO₃-Ca(HCO₃)₂-H₂O 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 // SO₄, CO₃ - H₂O 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 // SO₄, CO₃, HCO₃, F - H₂O 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 CaSO₄-CaCO₃-Ca(HCO₃)₂-H₂O 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 // SO₄, CO₃, HCO₃, F-H₂O 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 CaSO₄-CaCO₃-Ca(HCO₃)₂-H₂O 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, M.T. Jumaev, M.B. Usmonov, I.M. Nizomov // Russian Journal of 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, M.T. Jumaev, M. Usmonov // Russian Journal of 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. 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 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. Жумаев**, I. Gulom, B. Dzhabborov // Russian Journal of 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. Жумаев**, 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. 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 CaSO₄-CaCO₃-CaF₂-H₂O 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 // SO₄, HCO₃ - H₂O при 0 °C / Л. Солиев, М.Т. Джумаев, А. Варкаева, Д. Музагарова // Доклады Академии наук Республики Таджикистан, -2018. -Т. 61. -№ 11-12. -С. 862-868.

[34-М]. Soliev, L. Phase equilibrium of Na, Ca // SO₄, HCO₃ - H₂O systems at 0 °C / L. Soliev, M.T. Jumaev, 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 // SO₄, CO₃, HCO₃ - H₂O 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 // SO₄, CO₃, HCO₃ – H₂O 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 // SO₄, F - H₂O 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 // SO₄, CO₃ - H₂O 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 K₂SO₄-K₂CO₃-KHCO₃–H₂O при 25 °C / Л. Солиев, **М.Т. Жумаев**, Б.М. Иброгимова // Политехнический вестник. Серия инженерные исследования. -2019. -№1(45). -С. 121-126.

[40-М]. 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. Muzaferova // American Scientific Journal. -2019. -Vol. 28. -№ 2. -PP. 49-55.

[41-М]. Солиев, Л. Таҳлили муқоисавии соҳтори комплекси фазагии системаи Na₂SO₄-Na₂CO₃-NaHCO₃-H₂O дар ҳарорати 75 ва 100 °C / Л. Солиев, М.Т. Жумаев, Р.О. Тураев, X.Р. Маҳмадов, Н.В. Олимчонова // Паёми донишгоҳи милли Тоҷикистон. Бахши илмҳои табии. -2019. -№2. -С. 179-184.

[42-М]. Soliev, L. Solubility in the Na, Ca || SO₄, HCO₃ - H₂O system at 25 °C / L. Soliev, M.T. Jumaev, M. Varkaeva, H.R. Makhmadov // Chimica Techno Acta. -2019. -Vol.6. -№ 4. -PP. 130-137.

[43-М]. 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-М]. 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-М]. Soliev, L. Phase complex of the system Na, Ca || SO₄, CO₃, HCO₃-H₂O at 100 °C / L. Soliev, M.T. Jumaev // Chimica Techno Acta. -2020. -Vol.7. -№2. -PP. 71-80.

[46-М]. 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-М]. 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-М]. 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-М]. Солиев, Л. Фазовый комплекс взаимной системы Na, Ca || SO₄, CO₃ - H₂O при 75 и 100 °C / Л. Солиев, М.Т. Жумаев, X.Р. Маҳмадов, Д.З. Музрафара / / ДАН Республики Таджикистан. -2020. -Т.63. -№ 9-10. -С. 618-625.

[50-М]. 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 миллии Тоҷикистон. Бахши илмҳои табии. -2020. -№ 4. -С. 277-285.

[51-М]. 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-М]. 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-М]. Солиев, Л. Соҳтори диаграммаи мувозинатҳои фазагии системаи Na, Ca || SO₄, CO₃, HCO₃ - H₂O дар ҳарорати 100 °C / Л. Солиев, М.Т. Жумаев // Паёми политехники. Бахши таҳқиқотҳои муҳандисӣ. -2021. -№ 2(54). -С. 49-56.

[54-М]. Солиев, Л. Таҳлили муқоисавии диаграммаи ҳалшавандагии системаи Na, Ca || SO₄, CO₃ - H₂O дар ҳароратҳои 0, 25 ва 50 °C / Л. Солиев, М.Т. Жумаев, X.Р. Маҳмадов, Д.З. Музффара. Паёми донишгоҳи омӯзгорӣ. Бахши илмҳои табии). - 2021. -№ 1 (10-11). -С. 253-257.

[55-М]. 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-М]. Солиев, Л. Дивариантные 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 $\text{Na}, \text{Mg}, \text{Ca} \parallel \text{SO}_4, \text{CO}_3 - \text{H}_2\text{O}$ 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 $\text{Na}_2\text{SO}_4\text{-CaSO}_4\text{-Al}_2(\text{SO}_4)_3\text{-H}_2\text{O}$ при изотерме 298 K / 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 $\text{K}_2\text{SO}_4\text{-KHCO}_3\text{-KF-H}_2\text{O}$ 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 $\text{K}_2\text{SO}_4\text{-K}_2\text{CO}_3\text{-KHCO}_3\text{-KF-H}_2\text{O}$ 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, M.T. 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 $\text{Na}, \text{Ca} \parallel \text{SO}_4, \text{CO}_3 - \text{H}_2\text{O}$ при 50°C / Л. Солиев, М.Т. Жумаев, X.R. Махмадов, Д. Музафарова // Вестник таджикского национального университета. Серия естественных наук. -2022. -№ 3. -С. 123-130.

[63-М]. Солиев, Л. Строение фазового комплекса истемы $\text{KCl}\text{-MgCl}_2\text{-CaCl}_2\text{-H}_2\text{O}$ при 0°C / Л. Солиев, М.Т. Жумаев // Вестник технологического университета. -2022. -№ 2(49). -С. 30-35.

[64-М]. Солиев, Л. Фазовый комплекс системы $\text{Na}_2\text{SO}_4\text{-CaSO}_4\text{-Al}_2(\text{SO}_4)_3\text{-H}_2\text{O}$ 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 $\text{Na}, \text{Ca}, \text{Al} \parallel \text{SO}_4, \text{CO}_3 - \text{H}_2\text{O}$ при 273 K / Д.З. Музафарова, М.Т. Жумаев, Л. Солиев // Доклады НАН Таджикистана. -2023. -Т. 66. -№ 3-4. -С. 223-230.

[66-М]. Олимчонова, Н.В. Фазообразование в системе $\text{Na}, \text{Ca}, \text{Al} \parallel \text{SO}_4, \text{HCO}_3 - \text{H}_2\text{O}$ при 298 K / Н.В. Олимчонова, 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 K / 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 $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$ при 298 K / 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 $\text{Na}, \text{Ca}, \text{Al} \parallel \text{SO}_4, \text{HCO}_3 - \text{H}_2\text{O}$ at 273 K / N.V. Olimjonova, D.Z. Muzafarova, M.T. 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 $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+} \parallel \text{CO}_3^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$ барои 348 K / М.Т. Жумаев, Л. Солиев // Паёми донишгоҳи омӯзгорӣ. Бахши илмҳои табии. -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°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. Параметрои концентратсионии ҳосилшавии фазаҳои саҳти мувозинатии системаи $\text{Ca}^{2+}\text{-SO}_4^{2-}\text{-CO}_3^{2-}\text{-2HCO}_3^- \text{-H}_2\text{O}$ дар ҳарорати 75°C / М.Т. Жумаев, Ҷ.М. Мусоҷонзода, Л. Солиев // Паёми донишгоҳи технологияи Тоҷикистон. -2024. -№2(57). -С.22-29.

[73-М]. Низомов, И.М. Фазовые равновесия системы Na, K || SO₄, CO₃, HCO₃, F - H₂O 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 || SO₄, HCO₃ - H₂O 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 CaCO₃-CaF₂-Al₄Si₄O₁₀(OH)₈-TiO₂. / 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 H₂O-2Na⁺-Ca²⁺-2Al-(SO₄²⁻)₅ барои 273 К / М.Т. Жумаев, Д.З. Музафарова, М. Раҳимова, Л. Солиев // Паёми донишгоҳи омӯзгорӣ. Бахши илмҳои табии. -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. 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.

Тезисы статей в материалах научных конференций:

[80-А]. Жумаев, М. Фазовые равновесия системы Na, Ca // SO₄, CO₃ - H₂O при 0 °C / 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 // CO₃, HCO₃ - H₂O / 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 нонвариантных точках системы Na, Ca // SO₄, CO₃, HCO₃, F – H₂O при 25 °C 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 // SO₄, HCO₃ - H₂O при 0 и 25 °C / Л. Солиев, М.Т. Жумаев, Ш.Х. Авлоев // Матер. Междунар. конф. «Экологобезопасные и ресурсосберегающие технологии и материалы». -Улан-Удэ. -2014. -С. 226-228.

[84-А]. Jumaev, M.T. Phase balance in system Na, Ca // SO₄, CO₃, HCO₃ - H₂O at 0 °C / М.Т. 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 // SO₄, CO₃, HCO₃, F - H₂O (изотерма 25 °C) / 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 нонвариантных точек системы Na, Ca // SO₄, CO₃, HCO₃, F - H₂O при 25 °C / 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 // SO₄, CO₃, HCO₃ - H₂O 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 CaSO₄-CaCO₃-Ca(HCO₃)-H₂O 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 CaSO₄-CaCO₃-Ca(HCO₃)-H₂O 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 // SO₄, CO₃ - H₂O при 25 °C/ И. Борисов, М. Шолидодов, М. Джумаев, А. Набиев // Материалы II Всероссийской молодёжной конференции – школы с международным участием. «Достижения химии в агропромышленном комплекс». --Уфа. -2016. -С. 31-36.

[91-А]. Солиев, Л. Строение диаграммы растворимости системы Na, Ca // SO₄, CO₃ - H₂O при 0 °C. / Л. Солиев, М.Т. Жумаев, М. Усмонов, И. Низомов // Материалы XI Международного Курнаковского совещания по физико-химическому анализу в рамках XXI Менделеевского съезда по общей и прикладной химии. -Воронеж. -2016. -С. 217-221.

[92-А]. Солиев, Л. Изотермы растворимости и фазовых равновесий системы Na, Ca // SO₄, CO₃ - H₂O 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 // CO₃, HCO₃ - H₂O 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 Na₂SO₄-Na₂CO₃-NaHCO₃-H₂O 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 // SO₄, CO₃ – H₂O 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 // SO₄, CO₃ – H₂O 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 // SO₄, CO₃ – H₂O 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 // SO₄, CO₃ - H₂O при 25 °C / Л. Солиев, М.Т. Жумаев, Б. Джабборзода // Сборник статей по итогам междунар. науч. практ. конф. –Стерлитамак. -2020. -С.118.

[99-А]. 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 // 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 нонвариантных точек системы Na, Ca // SO₄, CO₃, HCO₃ - H₂O 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-А]. Жумаев М.Т. Определение фазовых равновесий в системе K₂SO₄-KHCO₃-KF-H₂O при 0 °C / 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 // SO₄, CO₃, HCO₃ - H₂O при 0, 25, 50 °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-А]. Жумаев, М.Т. Строение диаграмм фазового комплекса системы Na, Ca // SO₄, CO₃, HCO₃ - H₂O при 100 °C / М.Т. Жумаев, Л. Солиев // Материалы Республиканской конференции «Современное состояние и перспективы физико-химические 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 Na₂SO₄-Na₂CO₃-NaHCO₃-H₂O при 75 °C / М.Т. Жумаев, Л. Солиев // 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 CaSO₄-CaCO₃-Ca(HCO₃)₂-H₂O 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-А]. Жумаев, М.Т. Сохтори диаграммаи системаи 3Ca²⁺-SO₄²⁻-O₃²⁻-2HCO₃-H₂O дар ҳарорати 75 °C / М.Т. Жумаев, Л. Солиев // Маводи конференсияи байналмилалии илмӣ-амалӣ дар мавзуи «Нақши химия ва саноати химияӣ дар саноатикуонии Тоҷикистон». -Душанбе. -2024. С. 64-69.

[108-А]. 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-А]. Жумаев, М.Т. Изучение растворимости системы Ca²⁺, Na⁺ // CO₃²⁻, SO₄²⁻ - H₂O при 75 °C / 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 // 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-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 // 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-А]. Жумаев, М.Т. Растворимость системы 3Ca²⁺-SO₄²⁻-O₃²⁻-2HCO₃-H₂O при 75 °C / М.Т. Жумаев, Л.Солиев // Материалы Междун. науч. практ. конф. «Комплексные соединения и аспекты их применения». -Душанбе. -2025. -С. 17-20.

[114-А]. 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 $^\circ\text{C}$ / 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-А]. 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 Нӯъмоновӣ дар мавзӯи: «Марҳилаҳои мусири рушди илмҳои кимиёвӣ ва техники: масъалаҳои мубрами назария ва амалия». -Душанбе. -2025. -С. 70-74.

[116-А]. Жумаев, М.Т. Сохтори диаграммаи системаи $\text{CaCO}_3\text{-CaF}_2\text{-Al}_4\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8\text{-TiO}_2$ / М.Т. Жумаев, А.Ш. Муродиён, 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-А]. Жумаев, М.Т. Уточнение фазовой диаграммы в многокомпонентной системе Na , $\text{Ca} \parallel \text{SO}_4$, CO_3 , HCO_3 - H_2O при 100 $^\circ\text{C}$ / М.Т. Жумаев, Л. Солиев // «V-Байкальском материаловедческом форум». -Улан-Уде. -2025. -С. 78-79.

[118-А]. 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 саноатикуонии босуръати кишвар». -Душанбе. -2025. -С. 130-136.

АННОТАСИЯ

ба таҳқиқоти диссертатсионии Жумаев Маъруфжон Тағоймуротович дар мавзуи «Политерма комплекси фазагӣ ва ҳалшавандагии системай обӣ-намакии сулфатҳо, карбонатҳо, гидрокарбонатҳои натрий ва калсий» барои дарёфти дараҷаи илмии доктори илмҳои химия аз рӯйи ихтисосҳои 1.4.2 Химияи гайриорганикӣ ва 1.4.5 Химияи физикик

Калимаҳои қалидӣ: политерма, комплекси фазагӣ, фрагментатсия, хосиятҳои 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 бисёркомпонентай 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 секомпонентай: $\text{Na}^+ \parallel \text{SO}_4^{2-}$, 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^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{HCO}_3^-$ - H_2O мебошанд.

Ҳадафи таҳқиқот: мукаммалкунии усули пешгӯии политермаи комплекси фазагӣ дар системаи бисёркомпонентай обӣ-намакии иборат аз катионҳои натрий, калсий, анионҳои сулфат, карбонат, гидрокарбонат, соҳтани диаграммаҳои комплекси фазагӣ, омӯзиши ҳалшавандагӣ дар нуктаҳои нонвариантӣ ва истифодай маълумоти бадастомада барои ҳалли масъалаҳои амалии технологӣ мебошад.

Усулҳои таҳқиқот: таҳқиқи политермаи комплекси фазагӣ ва ҳалшавандагии системаи обӣ-намакии сулфатҳо, карбонатҳо, гидрокарбонатҳои натрий ва калсий ва зерсиятемаҳои чор-секомпонентай онро ташкилдиҳанда бо истифода аз усулҳои мусоири таҳлили физико-химиявӣ, хусусан усули транслятсия, массентрӣ, ҳалшавандагӣ.

Навғонии илмии таҳқиқот:

- усули пешгӯии политермии комплексҳои фазагӣ дар СБҚ такмил дода шудааст, ки он ба интиқоли элементҳои соҳтори системаҳои иборат аз n компонента ба ҳудуди системаи умумии иборат аз $(n + 1)$ компонента асос ёфтааст;

- усули соҳтани диаграммаҳои комплексҳои фазагии СБҚ чунин такмил дода шудааст, ки дар он ҳамаи комплексҳои фазагии имконпазир дар шаклҳои геометрӣ ва ҷойгиршавии якҷояи онҳо инъикоси ҳудро мёбанд;

- бо усули такмилдодашудаи назариявӣ, моделонии графикии пешгӯии политермаи комплекси фазагии системаҳои бисёркомпонента ҳамаи мувозинатҳои фазагии имконпазир дар 25 изотермаи системаҳои чоркомпонента ва 5 изотермаи системаҳои панҷкомпонентай сулфатҳо, карбонатҳо, гидрокарбонатҳои натрий ва калсий ба таври назариявӣ муайян карда шуда, диаграммаҳои изотермаҳои пурра комплекси фазагии системаҳои таҳқиқшуда соҳта шудаанд;

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

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

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

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

Тавсияҳо оид ба истифодай амалии натиҷаи таҳқиқот. Натиҷаҳои таҳқиқи политермаи ҳалшавандагӣ ва комплекси фазагӣ дар системаи бисёркомпонентай обӣ-намакии мувозизаи Na^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, CO_3^{2-} , HCO_3^- - H_2O ва соҳтори диаграммаи он имконият медиҳад, ки майдони кристаллизатсияи алоҳидаи 15 фаза, дар шароити додашуда фрагментатсияи карда шуда, хосиятҳои топологиии ифодаҳои геометрии ҳоси қисмҳои таркибии системаҳои ташкилкунандагӣ муайян гардида, вобаста ба онҳо, зимни коркард дар майдонҳои саҳти чоркомпонента як фаза ва дар саҳти панҷкомпонента ду фаза ҷудо карда шавад. Концентратсияи мувозинатӣ дар фазаҳои моеъи зимни кристаллизатсияи алоҳида барои майдон ва кристаллизатсияи якҷоя барои ҳатҳо ва нуктаҳо мӯқаррар карда шавад.

Дар асоси маълумот дар бораи соҳтори изотермаҳои мувозинати фазавӣ ва роҳҳои кристаллизатсия дар таҳқиқоти системаҳои обӣ-намакӣ, инчунин маълумоти тавсифи ҷараёни риёзии раванд, усулҳои зерини оптимизатсияи ҷузъҳои технологии коркарди маъданни полиминералӣ (партовҳои истехсолӣ) таҳия карда шудаанд; усулҳои ба даст овардани декагидрати карбонати натрий, нахколит ва виломит аз партовҳои моеъи истехсоли 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 $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}, \text{CO}_3^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$.

Объект научного исследования: Объектами исследования являются многокомпонентная система $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}, \text{CO}_3^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$ и её структурные четырёхкомпонентные подсистемы: $\text{Na}^+ \parallel \text{SO}_4^{2-}, \text{CO}_3^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}; \text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}, \text{CO}_3^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}; \text{Na}^+, \text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}, \text{CO}_3^{2-} - \text{H}_2\text{O}; \text{Na}^+, \text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}; \text{Na}^+, \text{Ca}^{2+} \parallel \text{CO}_3^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$, а также трёхкомпонентные подсистемы: $\text{Na}^+ \parallel \text{SO}_4^{2-}, \text{CO}_3^{2-} - \text{H}_2\text{O}; \text{Na}^+ \parallel \text{SO}_4^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}; \text{Na}^+ \parallel \text{CO}_3^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}; \text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}, \text{CO}_3^{2-} - \text{H}_2\text{O}; \text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}; \text{Ca}^{2+} \parallel \text{CO}_3^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}; \text{Na}^+, \text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-} - \text{H}_2\text{O}; \text{Na}^+, \text{Ca}^{2+} \parallel \text{CO}_3^{2-} - \text{H}_2\text{O}; \text{Na}^+, \text{Ca}^{2+} \parallel \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$.

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 $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}, \text{CO}_3^{2-}, \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$ 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 четырёхкомпонентного 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-} , $\text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$ 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-} , $\text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$ and its structural four-component subsystems:

$\text{Na}^+ \parallel \text{SO}_4^{2-}$, CO_3^{2-} , $\text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$; $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, CO_3^{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^+ , $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{CO}_3^{2-}$, $\text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$ as well as the three-component subsystems: $\text{Na}^+ \parallel \text{SO}_4^{2-}$, $\text{CO}_3^{2-} - \text{H}_2\text{O}$; $\text{Na}^+ \parallel \text{SO}_4^{2-}$, $\text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$; $\text{Na}^+ \parallel \text{CO}_3^{2-}$, $\text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$; $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, $\text{CO}_3^{2-} - \text{H}_2\text{O}$; $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-}$, $\text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$; $\text{Ca}^{2+} \parallel \text{CO}_3^{2-}$, $\text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$; $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+} \parallel \text{SO}_4^{2-} - \text{H}_2\text{O}$; $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+} \parallel \text{CO}_3^{2-} - \text{H}_2\text{O}$; $\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+} \parallel \text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$.

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-} , $\text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{O}$, 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 polymimetal raw materials (industrial waste) can be applied: Methods for obtaining sodium carbonate decahydrate, nahcolite, and villiaumite from liquid waste produced in aluminum manufacturing.