

М. Б. Усмонов, С. Умарали, П. А. Мухторов, Х. И. Холов

## АНАЛИЗ ФАЗОВЫХ РАВНОВЕСИЙ ЧЕТЫРЁХКОМПОНЕНТНОЙ СИСТЕМЫ

CaSO<sub>4</sub> – CaCO<sub>3</sub> – CaF<sub>2</sub> – H<sub>2</sub>O ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОМЫШЛЕННЫХ СТОЧНЫХ ВОД

*Ключевые слова:* фазовые равновесия, растворимость, кристаллизация, CaSO<sub>4</sub>, CaCO<sub>3</sub>, CaF<sub>2</sub>, промышленные сточные воды, утилизация отходов, алюминиевое производство, фазовая диаграмма.

*В данной работе представлен анализ фазовых равновесий в четырёхкомпонентной системе CaSO<sub>4</sub> – CaCO<sub>3</sub> – CaF<sub>2</sub> – H<sub>2</sub>O, важной для оптимизации промышленных сточных вод. Система рассматривается в контексте шестикомпонентной системы Na, Ca // SO<sub>4</sub>, CO<sub>3</sub>, HCO<sub>3</sub>, F – H<sub>2</sub>O, изучаемой для разработки методов утилизации отходов, образующихся на крупных промышленных предприятиях, таких как Таджикский алюминиевый завод. В сточных водах таких заводов содержатся сложные соединения фторидов, карбонатов и сульфатов кальция, взаимодействующие в многокомпонентной системе. Это требует детального исследования фазовых равновесий, обеспечивающего контроль процессов кристаллизации и растворения для эффективного управления химическим составом вод. Метод растворимости, использованный в данном исследовании, позволил установить ключевые параметры, влияющие на кристаллизацию твёрдых фаз системы CaSO<sub>4</sub> – CaCO<sub>3</sub> – CaF<sub>2</sub> при 50°C, с акцентом на влияние концентрации и температуры на их кристаллообразование. Были определены инвариантные точки системы, где возможно совместное кристаллообразование гипса (CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O), кальцита (CaCO<sub>3</sub>) и флюорита (CaF<sub>2</sub>). Построенная диаграмма растворимости демонстрирует границы полей кристаллизации, что позволяет прогнозировать поведение данных компонентов в условиях производства и оценить их стабильность. Результаты исследования указывают на эффективность метода растворимости для анализа подобных систем, где фториды, карбонаты и сульфаты взаимодействуют в насыщенных растворах. Предложены новые методы осаждения фторидов и карбонатов, которые могут применяться для очистки сточных вод алюминиевых предприятий. Таким образом, полученные данные способствуют разработке более экологически безопасных технологий и повышают общую устойчивость процессов очистки воды от вредных примесей.*

М. B. Usmonov, S. Umarali, P. A. Mukhtorov, Kh. I. Kholov

## ANALYSIS OF PHASE EQUILIBRIA IN THE FOUR-COMPONENT SYSTEM

CASO<sub>4</sub> – CACO<sub>3</sub> – CAF<sub>2</sub> – H<sub>2</sub>O FOR OPTIMIZATION OF INDUSTRIAL WASTEWATER

*Keywords:* phase equilibria, solubility, crystallization, CaSO<sub>4</sub>, CaCO<sub>3</sub>, CaF<sub>2</sub>, industrial wastewater, waste disposal, aluminum production, phase diagram.

*This paper presents an analysis of phase equilibria in the four-component system CaSO<sub>4</sub> – CaCO<sub>3</sub> – CaF<sub>2</sub> – H<sub>2</sub>O, essential for optimizing industrial wastewater treatment. The system is considered within the context of the six-component system Na, Ca // SO<sub>4</sub>, CO<sub>3</sub>, HCO<sub>3</sub>, F – H<sub>2</sub>O, studied to develop waste disposal methods for large industrial facilities, such as the Tajik Aluminum Plant. The wastewater from such plants contains complex compounds of fluorides, carbonates, and calcium sulfates, interacting within a multi-component system. This requires a detailed study of phase equilibria to ensure control over crystallization and dissolution processes for effective chemical management of the water composition. The solubility method used in this study enabled the identification of key parameters influencing the crystallization of solid phases in the CaSO<sub>4</sub> – CaCO<sub>3</sub> – CaF<sub>2</sub> system at 50°C, focusing on the impact of concentration and temperature on crystal formation. The system's invariant points, where co-crystallization of gypsum (CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O), calcite (CaCO<sub>3</sub>), and fluorite (CaF<sub>2</sub>) is possible, were identified. The constructed solubility diagram shows the crystallization field boundaries, allowing predictions of component behavior under production conditions and an assessment of their stability. The study's results indicate the effectiveness of the solubility method for analyzing such systems where fluorides, carbonates, and sulfates interact in saturated solutions. New methods for precipitating fluorides and carbonates are proposed, which may be applied to purify wastewater from aluminum plants. Thus, the findings contribute to developing more environmentally friendly technologies and enhance the overall sustainability of processes for removing harmful impurities from water.*

## Введение

Четырёхкомпонентная система CaSO<sub>4</sub> – CaCO<sub>3</sub> – CaF<sub>2</sub> – H<sub>2</sub>O представляет собой важную часть более сложной шестикомпонентной системы Na, Ca // SO<sub>4</sub>, CO<sub>3</sub>, HCO<sub>3</sub>, F – H<sub>2</sub>O. Данная система изучается в рамках фазовых равновесий для лучшего понимания процессов, происходящих в ней при различных условиях. Вопросы, связанные с исследованием таких систем, имеют высокую актуальность в связи с необходимостью разработки методов утилизации жидких промышленных отходов, в частности образующихся при производстве алюминия на крупных предприятиях, таких как Таджикский алюминиевый

завод (ТадАз). Разработка эффективных решений для утилизации таких отходов требует глубокого научного анализа поведения этих многокомпонентных систем, что, в свою очередь, позволяет создать более надёжные и экологически безопасные методы очистки сточных вод [1,2].

Сточные воды, образующиеся в отделениях регенерации криолита алюминиевых заводов, содержат сложный состав веществ, включая фториды, карбонаты, гидрокарбонаты и сульфаты кальция. Эти химические соединения взаимодействуют друг с другом и с водой, образуя многокомпонентные системы, которые требуют глубокого изучения фазовых равнове-

сий для эффективного управления процессами их кристаллизации и растворения. Таким образом, исследование системы  $\text{Na, Ca // SO}_4, \text{CO}_3, \text{HCO}_3, \text{F} - \text{H}_2\text{O}$ , а также её производных пяти- и четырёхкомпонентных систем, является ключевым моментом для понимания механизмов химических реакций и осаждения солей в промышленных сточных водах [3].

Необходимость разработки надёжных методов утилизации сточных вод и удаления вредных компонентов, таких как фториды, обусловлена их негативным воздействием на окружающую среду. Сложность состоит в том, что данные компоненты имеют высокую растворимость и способны образовывать устойчивые соединения, что затрудняет их выделение из раствора стандартными методами. Одним из подходов является управление фазовыми переходами в водных растворах, что требует точного понимания условий, при которых возможно кристаллообразование или растворение тех или иных компонентов. Для этого необходимо детальное знание фазовых равновесий в системах, включающих несколько типов ионов [3].

На основе исследований фазовых равновесий были предложены новые методы осаждения солей, которые могут быть применены для очистки сточных вод алюминиевых заводов. Так, было показано, что правильный выбор условий, таких как температура, давление и концентрация ионов, может способствовать эффективному выделению фторидов и карбонатов в осадок, что позволяет минимизировать загрязнение и обеспечить безопасное хранение отходов [2]. Эти методы также позволяют сократить объём сточных вод, что является важным для снижения экологической нагрузки на окружающую среду и повышения общей эффективности производства алюминия [4].

На практике эти знания применяются для оптимизации процессов утилизации отходов и очистки сточных вод [5,6]. Неэффективное управление сточными водами может привести к загрязнению окружающей среды и потере полезных материалов, которые могут быть повторно использованы в производственном процессе [7,8]. Исследования в данной области направлены на изучение поведения солей в различных температурных и концентрационных условиях, чтобы разработать технологии, позволяющие безопасно и эффективно удалять или перерабатывать вредные вещества из промышленных сточных вод.

В рамках данного исследования был проведён детальный и всесторонний анализ системы  $\text{CaSO}_4 - \text{CaCO}_3 - \text{CaF}_2$  при температуре  $50\text{ }^\circ\text{C}$  с использованием метода растворимости. Основная цель работы заключалась в выявлении концентрационных параметров, которые влияют на расположение геометрических образов этой системы. Кроме того, исследование стремилось установить взаимосвязи между полями кристаллизации различных индивидуальных твёрдых фаз, находящихся в равновесном состоянии. Это позволяет глубже понять процессы кристаллизации и взаимодействия компонентов внутри системы.

Иными словами, исследование сосредоточено на том, как изменение концентраций компонентов в системе влияет на формирование и распределение кри-

сталлических структур. Для более детального понимания происходящих процессов были рассмотрены условия, при которых образуются кристаллические фазы, их стабильность и взаимосвязи [9]. Анализ полей кристаллизации позволяет определить, какие твёрдые фазы будут преобладать в равновесных условиях при данной температуре.

Изучение таких систем важно для понимания закономерностей кристаллизации и фазовых переходов, что, в свою очередь, может найти практическое применение в различных областях, например, в промышленной химии, материаловедении и минералогии.

Ранее, в работе [9], был использован метод трансляции для определения фазовых равновесий в данной системе, что позволило построить её фазовую диаграмму. Эта диаграмма демонстрирует границы и условия, при которых происходят переходы между различными фазами, то есть, когда и как образуются и разрушаются определённые кристаллические структуры при изменении температуры или концентрации компонентов. В новой работе, на основе ранее полученных данных, исследователи стремятся углубить понимание этих процессов, используя метод растворимости для более детального анализа.

Метод растворимости позволяет исследовать систему в условиях, близких к практическим, определяя точные концентрации растворённых веществ при различных условиях, что способствует точному определению фазовых границ и их взаимосвязей [10-12]. Это исследование имеет важное значение не только для теории, но и для практики, поскольку такие системы могут встречаться в природных минералах, строительных материалах или химических процессах [13-14].

### Экспериментальная часть

Исследуемая система при температуре  $50\text{ }^\circ\text{C}$  включает в себя равновесные твёрдые фазы, а именно: гипс ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), кальцит ( $\text{CaCO}_3$ ) и флюорит ( $\text{CaF}_2$ ). Гипс, обозначаемый как *Gn*, является сульфатом кальция в виде кристаллов с двумя молекулами воды. Кальцит, обозначаемый как *Cc*, представляет собой наиболее устойчивую полиморфную модификацию карбоната кальция. Флюорит, сокращённо *Fl*, это природный минерал, состоящий из фторида кальция.

Для проведения экспериментов мы тщательно отобрали ряд реактивов, которые напрямую соответствуют исследуемым фазам. В их число входят гипс ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) с квалификацией "химически чистый" (х.ч.), а также кальцит ( $\text{CaCO}_3$ ) и флюорит ( $\text{CaF}_2$ ), оба категории "чистый" (ч). Гипс, благодаря своему содержанию кристаллизационной воды, служит идеальной моделью для изучения процессов гидратации и дегидратации. Кальцит, как естественная форма карбоната кальция, позволяет глубже понять реакции в карбонатных системах. Флюорит, содержащий ионы фтора, важен для исследования поведения фторидных соединений при различных условиях. Использование именно этих реактивов обусловлено их способностью представлять фазы, которые важно исследовать в ходе эксперимента для достижения целевых результатов.

Методика проведения опытов базировалась на методе донасыщения, который был подробно описан в работе [15]. Суть метода донасыщения заключается в создании специфических условий, при которых исследуемые твёрдые фазы могут кристаллизоваться или вступать во взаимодействие в условиях насыщенных растворов. Эти растворы приближены к состоянию равновесия, что позволяет наиболее точно имитировать природные условия, в которых возможны фазовые переходы и изменения структуры твёрдых фаз [16].

Метод донасыщения является ключевым инструментом в изучении процессов кристаллизации и растворения, поскольку он позволяет наблюдать фазовые изменения в условиях, близких к естественным. Это способствует лучшему пониманию механизмов взаимодействия твёрдых фаз и их стабильности в различных геохимических системах.

Опираясь на литературные данные, представленные в работе [17], исследователи провели подготовку смесей осадков, которые затем были добавлены в насыщенные растворы. Эти растворы были приведены в соответствие с инвариантными точками, характерными для трёхкомпонентных систем, таких как  $\text{CaCO}_3 - \text{CaF}_2 - \text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CaCO}_3 - \text{CaSO}_4 - \text{H}_2\text{O}$  и  $\text{CaF}_2 - \text{CaSO}_4 - \text{H}_2\text{O}$ . Инвариантные точки представляют собой состояния, в которых возможно сосуществование трёх фаз, что критически важно для определения термодинамических характеристик системы [9]. Экспериментальные условия включали поддержание температуры на уровне  $50^\circ\text{C}$ , что позволило исключить влияние температурных колебаний на фазовые равновесия.

После этого, основываясь на схеме трансляции инвариантных точек, разработанной для трёхкомпонентных систем и применённой к четырёхкомпонентной системе [9], приготовленные растворы с соответствующими твёрдыми фазами были помещены в термостат и перемешивались до достижения равновесия. Это важный этап эксперимента, так как при достижении равновесия можно оценивать стабильность фазового состава системы.

Термостатирование выполнялось с использованием ультратермостата модели U-8, который обеспечивал стабильное поддержание заданной температуры в ходе экспериментов. Компоненты смеси перемешивались с применением магнитной мешалки модели PD-09 на протяжении времени, варьирующегося от 50 до 100 часов, что способствовало достижению равновесного состояния системы [27]. Такой

длительный период перемешивания необходим для того, чтобы все компоненты достигли термодинамического равновесия, обеспечивая воспроизводимые результаты и точное понимание происходящих процессов. Температура тщательно контролировалась с точностью до  $\pm 0,1^\circ\text{C}$  благодаря использованию контактного термометра, что позволило исключить любые колебания температуры, способные повлиять на ход и результаты процесса кристаллизации [9].

В процессе исследования кристаллизации твёрдых фаз использовался микроскоп «ПОЛАМ-Р 311». Этот инструмент позволял детально наблюдать зарождение и рост кристаллов непосредственно во время эксперимента. Когда визуально фиксировалась неизменность состава осадков, это свидетельствовало о том, что система достигла состояния равновесия. В этот момент твёрдые фазы фотографировались с использованием цифровой камеры «SONY DSC-S500», чтобы сохранить данные о кристаллических структурах.

После того как было установлено равновесие, проводился процесс разделения жидкой и твёрдой фаз. Для проведения процесса использовали вакуумный насос, который создавал пониженное давление, обеспечивая эффективную фильтрацию смеси через обеззоленную фильтровальную бумагу синей ленты, установленную на воронке Бюхнера. Этот метод позволял значительно ускорить процесс разделения фаз и повысить эффективность удаления твёрдых частиц из раствора. После фильтрации полученный осадок тщательно промывали 96%-ным этиловым спиртом. Промывка высококонцентрированным спиртом способствовала удалению остаточных следов раствора и растворимых примесей, что повышало степень чистоты осадка и готовило его для последующих этапов анализа. Очищенный осадок высушивался при температуре  $120^\circ\text{C}$  для последующего анализа.

## Результаты и их обсуждения

Химический состав исследуемых продуктов был проанализирован с использованием известных и широко применяемых методик, подробно описанных в литературных источниках [18-22]. Эти методы включают в себя стандартные процедуры для определения ключевых показателей качества и состава продуктов. Полученные результаты исследования были систематизированы и представлены в таблице 1, где отражены основные показатели химического состава каждого из образцов.

Таблица 1 – Растворимость в инвариантных точках системы  $\text{CaSO}_4 - \text{CaCO}_3 - \text{CaF}_2$  при  $50^\circ\text{C}$

Table 1 – Solubility at Invariant Points of the System  $\text{CaSO}_4 - \text{CaCO}_3 - \text{CaF}_2$  at  $50^\circ\text{C}$

№ точек	Содержание компонентов в жидкой фазе, мас. %				Фазовые компоненты осадков
	$\text{CaSO}_4$	$\text{CaCO}_3$	$\text{CaF}_2$	$\text{H}_2\text{O}$	
$e_1$	0.210	-	-	99.790	$\Gamma n$
$e_2$	-	0.0054	-	99.995	$Cy$
$e_3$	-	-	0.340	99.660	$\Phi o$
$E_1^3$	0.107	0.0042	-	99.889	$\Gamma n + Cy$
$E_2^3$	0.1585	-	0.385	99.457	$\Phi o + \Gamma n$
$E_3^3$	-	0.0029	0.431	99.566	$Cy + \Phi o$
$E_1^4$	0.376	0.0061	0.203	99.415	$Cy + \Gamma n + \Phi o$

Результаты кристаллооптического анализа равновесных твёрдых фаз, полученные согласно данным из источника [23,24], наглядно демонстрируются на микрофотографиях, приведённых на рисунке 1. Эти изображения позволяют более детально рассмотреть особенности строения твёрдых фаз в равновесном состоянии, включая микроструктуру и распределение кристаллитов. Использование кристаллооптического метода анализа помогает визуализировать структурные элементы материалов, что способствует лучшему пониманию их свойств и поведения при различных условиях.

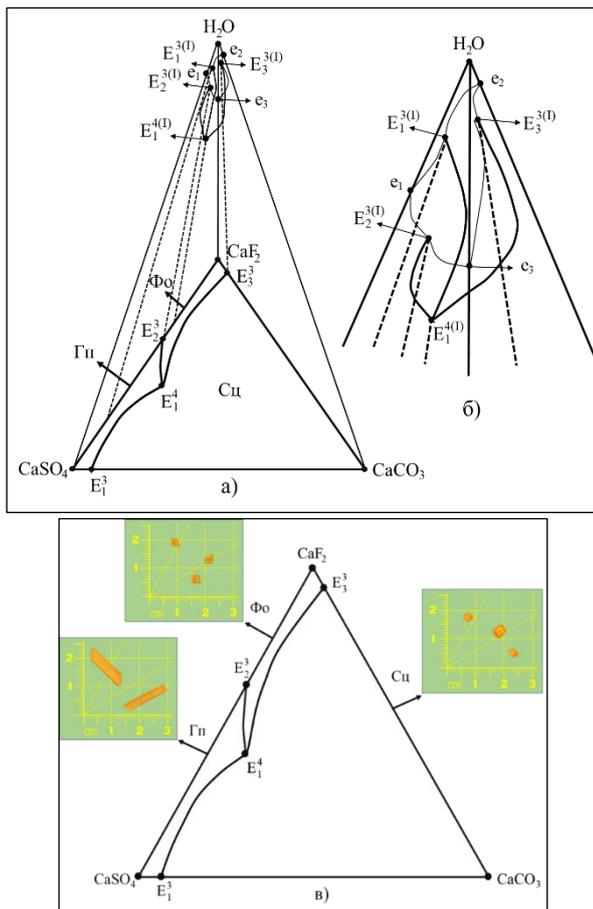


Рис. 1 – Диаграмма растворимости системы  $\text{CaSO}_4 - \text{CaCO}_3 - \text{CaF}_2 - \text{H}_2\text{O}$  при  $50^\circ\text{C}$ : а) общая диаграмма; б) водная часть; в) солевая часть с микрофотографиями равновесных твёрдых фаз системы

Fig. 1 – Solubility diagram of the  $\text{CaSO}_4 - \text{CaCO}_3 - \text{CaF}_2 - \text{H}_2\text{O}$  system at  $50^\circ\text{C}$ : а) overall diagram; б) aqueous part; в) salt part with microphotographs of the equilibrium solid phases of the system

Снижение растворимости сульфата кальция в системе, состоящей из  $\text{CaSO}_4$ ,  $\text{CaF}_2$  и воды (в определённой точке), по сравнению с его растворимостью в чистой воде (точка  $e_1$ ), можно объяснить высаливающим эффектом фторида кальция при данных условиях. Высаливающий эффект проявляется, когда добавление растворённого вещества, такого как фторид кальция, уменьшает растворимость другого вещества в растворе.

Присутствие фторида кальция снижает способность сульфата кальция растворяться в воде за счёт увеличения ионной силы раствора и влияния эффекта общего иона. Ионы кальция ( $\text{Ca}^{2+}$ ), возникающие при растворении  $\text{CaF}_2$ , повышают концентрацию общих ионов в системе, что приводит к сдвигу равновесия растворимости сульфата кальция в сторону образования осадка. Взаимодействие между ионами в растворе, включая усиление электростатических сил и образование ионных пар, создаёт условия, при которых сульфат кальция выпадает в осадок более интенсивно, чем в чистой воде.

На основании полученных экспериментальных данных была построена диаграмма растворимости системы  $\text{CaSO}_4 - \text{CaCO}_3 - \text{CaF}_2$  при температуре  $50^\circ\text{C}$ , которая представлена на рисунке 1б. На данной диаграмме были определены положения невариантных точек, соответствующих трехкомпонентным ( $E_n^3$ ) и четырехкомпонентным ( $E_n^4$ ) составам, где  $n$  обозначает номера этих точек. Расположение невариантных точек характеризует область взаимодействия компонентов в системе и указывает на равновесные концентрации фаз. Для установления этих точек использовался массцентрический метод, что подробно описано в источниках [25, 26]. Такой подход позволяет точно определить соотношение компонентов и их поведение в различных фазовых состояниях, обеспечивая понимание закономерностей, управляющих растворимостью в данной многокомпонентной системе.

Поскольку растворимость солей в рассматриваемой системе оказывается крайне низкой, это приводит к значительному изменению положения фигуративных точек на фазовой диаграмме. Эти точки смещаются в сторону "водного угла" диаграммы — той области, в которой содержание воды достигает максимальных значений. В связи с этим концентрация воды была выбрана в пропорции 1:5 относительно других компонентов системы. Это решение связано с тем, что для исследования системы с низкой растворимостью важно точно учитывать влияние воды, которая является основным растворителем.

На рисунке 1 приведены две диаграммы растворимости системы  $\text{CaSO}_4 - \text{CaCO}_3 - \text{CaF}_2$  при температуре  $25^\circ\text{C}$ . Первая диаграмма (а) является общей, а вторая (б) отображает солевую часть системы. Эти диаграммы иллюстрируют взаимное расположение и относительные размеры областей кристаллизации различных равновесных фаз, образующихся при изменении условий растворимости. Каждая из отображённых на диаграммах областей соответствует зонам, в которых происходит кристаллизация определённых химических соединений, в зависимости от концентрации компонентов и условий растворения.

При анализе системы при температуре  $50^\circ\text{C}$ , в отличие от  $25^\circ\text{C}$ , можно заметить, что на диаграмме кристаллизации флюорита ( $\text{CaF}_2$ ) и кальцита ( $\text{CaCO}_3$ ) занимают значительно большие области. Это свидетельствует о низкой растворимости этих солей в данных температурных условиях и, соответственно, о их высокой склонности к кристаллизации. Более того, данное явление указывает на то, что в температурном диапазоне  $50^\circ\text{C}$  эти вещества почти

не растворяются в растворе и преобладают в кристаллической форме в большинстве условий системы.

Диаграмма, изображенная на рисунке 1, отображает различные геометрические элементы, такие как кристаллизационные поля, кривые равновесия и точки пересечения фаз, что является важным инструментом для изучения поведения компонентов системы. Эти элементы помогают наглядно понять, при каких условиях начинают кристаллизоваться различные минералы, и как изменения температуры влияют на их растворимость и кристаллизацию. Более детально описание этих элементов, их характерные особенности и взаимосвязь представлены в таблице 2. В таблице указаны параметры, которые необходимы для анализа и интерпретации процессов, происходящих в системе, и их влияние на термодинамическую стабильность фаз в зависимости от температуры.

**Таблица 2 – Характеристика геометрических элементов (площадей, кривых линий, точек) на рисунке 1**

**Table 2 – Characteristics of Geometric Elements (Areas, Curved Lines, Points) in Figure 1**

Обозначения геометрических образов	Расшифровка обозначений
$e_1$	Растворимость сульфата кальция в воде
$e_2$	Растворимость карбоната калия в воде
$e_3$	Растворимость фторида кальция в воде
$E_1^3$	Точка совместной кристаллизации $Gn+Cu$ в системе $CaSO_4-CaCO_3-H_2O$
$E_2^3$	Точка совместной кристаллизации $Gn+Φo$ в системе $CaSO_4-CaF_2-H_2O$
$E_3^3$	Совместная точка кристаллизации $Cy+Φo$ в системе $CaCO_3-CaF_2-H_2O$
$E_1^4$	Совместная точка кристаллизации $Gn+Cu+Φo$ в системе $CaSO_4-CaCO_3-CaF_2-H_2O$
$e_1E_1^3E_1^4E_2^3e_1$	Кристаллизационное поле $Gn$ в системе $CaSO_4-CaCO_3-CaF_2-H_2O$
$e_3E_2^3E_1^4E_3^3e_3$	Кристаллизационное поле $Φo$ в системе $CaSO_4-CaCO_3-CaF_2-H_2O$
$e_2E_1^3E_1^4E_3^3e_2$	Кристаллизационное поле $Cy$ в системе $CaSO_4-CaCO_3-CaF_2-H_2O$

### Заключение

Проведённое исследование четырёх-компонентной системы  $CaSO_4 - CaCO_3 - CaF_2 - H_2O$  при  $50^\circ C$  с использованием метода растворимости позволило установить основные закономерности фазовых равновесий и положения невариантных точек. Эти

данные представляют практическую ценность для промышленности, в частности для разработки эффективных методов утилизации сточных вод на алюминиевых заводах. Полученные результаты способствуют более глубокому пониманию процессов кристаллизации и растворимости, что важно для управления химическими реакциями и предотвращения загрязнения окружающей среды. Исследования в данной области имеют значительный потенциал для улучшения технологий очистки сточных вод и повышения экологической безопасности промышленных предприятий.

### Литература

- Орифов А.О., Зокиров Р.С. *Вестник Таджикского государственного университета права, бизнеса и политики. Серия гуманитарных наук.* 1, 65-71, (2009).
- Мирсаидов У. М., Исмадинов М. Э., Сафиев Х. С. Проблемы экологии и комплексная переработка сырья и отходов производства. *Душанбе: Дониш.* 1999, 53 с.
- Куликов Б.П., Васюнина Н.В., Дубова И.В., Самойло А.С., Баланев Р.О., Безруких А.И., Домбровский Н.С. *Ползуновский вестник.* 2, 208-216, (2024).
- Ассакунова Б., Болотов Т. *Scientific Collection «Inter-Conf».* 181, 408-413, 2023.
- Патрин Р.К., Сизяков В.М., Бажин В.Ю. *Известия вузов. Цветная Металлургия.* 6, 61-63, (2015).
- Дампилон Ж.В. *Вестник Чувашского университета.* 3, 349-354, (2008).
- Бажин В.Ю., Власов А.А., Патрин Р.К. *Безопасность жизнедеятельности.* 9, 18-21, (2010).
- Эрматов А.Г., Мирсаидов У.М., Сафиев Х.С., Азизов Б. Утилизация отходов производства алюминия // *Душанбе: Дониш.* 2006, 62 с.
- Солиев Л., Усмонов М., Джумаев М., Мухторов П. *Международный научный журнал Символ Науки.* 10, 9-12, (2017).
- Liu J., Pan J., Zeng Y., Liu X., Yu X., Song X., Chen L. *Journal of Chemical & Engineering Data.* 64, 3, 1222-1227, (2019).
- Ying W., Zeng Y., Lv X., Tong H., Zuo W., Xu P., Yu X. *Journal of Chemical & Engineering Data.* 66, 4, 1730-1740, (2021).
- Zeng Y., Luo J., Wang K., Liao S., Ye G., Lv N., Yu X. *Journal of Chemical & Engineering Data.* 68, 1, 261-272, (2022).
- Tong H., Zeng Y., Yu X., Zuo W., Ying W., Xu P., Li J. *Journal of Chemical & Engineering Data.* 65, 10, 4751-4761, (2020).
- Zuo W., Zeng Y., Yu X., Ying W., Tong H., Liu J., Xu P. *Journal of Chemical & Engineering Data.* 65, 1, 133-139, (2019).
- Горощенко Я.Г., Солиев Л., Горников Ю.И. *Укр. хим. журн.* 53, 6, 568, (1987).
- Винник А. Л., Сулаева А. А. *Охрана плодородия почв.* 17, (2010).
- Солиев Л. *Журнал неорганической химии.* 64, 7, 741-745, (2019).
- Харитонов Ю.Я. Аналитическая химия: учебник. - Москва: ГЭОТАР-Медиа, 2018, 320 с. - ISBN 978-5-9704-4400-9. - Текст: электронный // URL: <https://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785970444009.html>
- Мовчан Н.И., Романова Р.Г., Горбунова Т.С., Евгеньева И.И. Основы аналитической химии. Химические методы анализа. Казань: Казанский национальный исследовательский технологический университет, 2012, 195 с. Текст: электронный // <https://www.iprbookshop.ru/61991.html>

20. Соддииков Ф.Б., Мамаджанов З.Н., Турсунов Л.А., Юлдашева М.А. *Universum: технические науки*. 4-4 (85), 42-45, (2021).
21. Khamrakulov Z.A., Askarova M.K., Tukhtaev S. *Russian Journal of Inorganic Chemistry*. 60, 1286-1291, (2015).
22. Справочник экспериментальных данных по растворимости многокомпонентных водно-солевых систем. Т. II, кн. 1-2. –СПб.: Химиздат. 2004, 1247 с.
23. Давлатшоев С.К., Рахимов Б.Н. *Общественные проблемы инженерной подготовки кадров МЧС России*. 44-50, (2021).
24. Татарский В.Б. Кристаллооптика и иммерсионный метод анализа веществ. Л.: ЛГУ. 1948, 268 с.
25. Солиев Л. *Журнал неорганической химии*. 65, 2, 212-217, (2020).
26. Горощенко Я.Г. Массцентрический метод изображения многокомпонентных систем. *Наук. Думка*. 1982, 263 с.
27. Макарычев С.В., Беховых Ю.В., Болотов А.Г. *Вестник Алтайского государственного аграрного университета*. 68, 6, 23-27, (2010).
11. Ying W., Zeng Y., Lv X., Tong H., Zuo W., Xu P., Yu X. *Journal of Chemical & Engineering Data*. 66, 4, 1730-1740, (2021).
12. Zeng Y., Luo J., Wang K., Liao S., Ye G., Lv N., Yu X. *Journal of Chemical & Engineering Data*. 68, 1, 261-272, (2022).
13. Tong H., Zeng Y., Yu X., Zuo W., Ying W., Xu P., Li J. *Journal of Chemical & Engineering Data*. 65, 10, 4751-4761, (2020).
14. Zuo W., Zeng Y., Yu X., Ying W., Tong H., Liu J., Xu P. *Journal of Chemical & Engineering Data*. 65, 1, 133-139, (2019).
15. Goroshenko Ya.G., Soliev L., Gornikov Yu.I. *Ukr. Chem. J.* 53, 6, 568, (1987).
16. Vinnik A.L., Sulaeva A.A. *Soil Fertility Protection*. 17, (2010).
17. Soliev L. *Journal of Inorganic Chemistry*. 64, 7, 741-745, (2019).
18. Kharitonov Yu.Ya. *Analytical Chemistry: Textbook. Moscow: GEOTAR-Media*, 2018, 320 p. - ISBN 978-5-9704-4400-9. - Text: electronic. URL: <https://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785970444009.html>
19. Movchan N.I., Romanova R.G., Gorbunova T.S., Evgenyeva I.I. *Fundamentals of Analytical Chemistry. Chemical Analysis Methods. Kazan: Kazan National Research Technological University*, 2012, 195 p. Text: electronic // <https://www.iprbookshop.ru/61991.html>
20. Soddiikov F.B., Mamajanov Z.N., Tursunov L.A., Yuldasheva M.A. *Universum: Technical Sciences*. 4-4 (85), 42-45, (2021).
21. Khamrakulov Z.A., Askarova M.K., Tukhtaev S. *Russian Journal of Inorganic Chemistry*. 60, 1286-1291, (2015).
22. Handbook of Experimental Data on the Solubility of Multicomponent Aqueous-Salt Systems. Vol. II, Books 1-2. - SPb.: Khimizdat. 2004, 1247 p.
23. Davlatshoev S.K., Rakhimov B.N. *General Scientific Issues of Emergency Management Training in Russia*. 44-50, (2021).
24. Tatarsky V.B. *Crystal Optics and Immersion Method for Substance Analysis. L.: Leningrad State University*. 1948, 268 p.
25. Soliev L. *Journal of Inorganic Chemistry*. 65, 2, 212-217, (2020).
26. Goroshenko Ya.G. *Mass-Centered Method for Representation of Multicomponent Systems. Naukova Dumka*. 1982, 263 p.
27. Makarychev S.V., Bekhovykh Yu.V., Bolotov A.G. *Bulletin of Altai State Agrarian University*. 68, 6, 23-27, (2010).

### References

1. Orifov A.O., Zokirov R.S. *Bulletin of the Tajik State University of Law, Business and Politics. Humanities Series*. 1, 65-71, (2009).
2. Mirsaidov U.M., Ismatdinov M.E., Safiev K.S. *Environmental Issues and Comprehensive Processing of Raw Materials and Production Waste. Dushanbe: Donish*. 1999, 53 p.
3. Kulikov B.P., Vasyunina N.V., Dubova I.V., Samoylo A.S., Balanov R.O., Bezrukikh A.I., Dombrovsky N.S. *Polzunov Bulletin*. 2, 208-216, (2024).
4. Assakunova B., Bolotov T. *Scientific Collection "InterConf"*. 181, 408-413, 2023.
5. Patrín R.K., Sizyakov V.M., Bazhin V.Y. *Proceedings of Universities. Non-ferrous Metallurgy*. 6, 61-63, (2015).
6. Dampilon Zh.V. *Bulletin of Chuvash University*. 3, 349-354, (2008).
7. Bazhin V.Y., Vlasov A.A., Patrín R.K. *Life Safety*. 9, 18-21, (2010).
8. Ermatov A.G., Mirsaidov U.M., Safiev K.S., Azizov B. *Aluminum Production Waste Utilization // Dushanbe: Donish*. 2006, 62 p.
9. Soliev L., Usmonov M., Jumayev M., Mukhtorov P. *International Scientific Journal Symbol of Science*. 10, 9-12, (2017).
10. Liu J., Pan J., Zeng Y., Liu X., Yu X., Song X., Chen L. *Journal of Chemical & Engineering Data*. 64, 3, 1222-1227, (2019).

© **М. Б. Усмонов** – кан. хим. наук, заведующий кафедрой Химической технологии и экологии (ХТЭ), Таджикский государственный педагогический университет им. С. Айни (ТГПУ им. С. Айни), Душанбе, Республика Таджикистан, usmonov.86@mail.ru; **С. Умарали** – соискатель кафедры ХТЭ, ТГПУ им. С. Айни, Safarali.umarali91@mail.ru; **П. А. Мухторов** – соискатель кафедры ХТЭ, ТГПУ им. С. Айни; **Х. И. Холов** – кан. тех. наук, и.о. доцента кафедры ХТЭ, ТГПУ им. С. Айни, Kholmahmad90@mail.ru.

© **М. В. Usmonov** – PhD (Chemical Sci.), Head of the Department of Chemical Technology and Ecology (CTE), Tajik State Pedagogical University named after S. Aini (TSPU named after S. Aini), Dushanbe, Republic of Tajikistan, usmonov.86@mail.ru; **S. Umarali** – Competitor of the CTE department, TSPU named after S. Aini, Safarali.umarali91@mail.ru; **P. A. Mukhtorov** – Competitor of the CTE department, TSPU named after S. Aini; **Kh. I. Kholov** – PhD (Technical Sci.), Acting Associate Professor of the CTE department, TSPU named after S. Aini, Kholmahmad90@mail.ru.

Дата поступления рукописи в редакцию – 22.10.25

Дата принятия рукописи в печать – 11.02.26