

Статья поступила в редакцию: 03.07.2026

Статья принята к публикации: 08.07.2026

Статья опубликована: 07.08.2026

УДК 546.56:546.74:544.654.2

## **Физико-химические основы очистки сульфата меди от никеля методом его перекристаллизации**

**Фузайлова Феруза Нормуродовна**

д-р техн. наук, PhD

Институт общей и неорганической химии АН Республики Узбекистан

Узбекистан, г. Ташкент

E-mail: foozayl\_17.06@mail.ru

**Расулова Ситорабону Нормуродовна**

д-р хим. наук, гл. науч. сотр., Институт общей и неорганической химии АН Республики

Узбекистан

Узбекистан, г. Ташкент

**Гуро Виталий Павлович**

д-р хим. наук, проф.

Институт общей и неорганической химии АН Республики Узбекистан

Узбекистан, г. Ташкент

**Дадаходжаев Абдулла Турсунович**

д-р техн. наук, проф.

Ташкентский государственный технический университет

Республика Узбекистан, г. Ташкент

## **Physicochemical principles of copper sulfate purification from nickel by recrystallization**

**Fuzaylova Feruza**

PhD

in Technical Sciences Institute of General and Inorganic Chemistry, Uzbekistan Academy of Sciences

Republic of Uzbekistan, Tashkent

**Rasulova Sitorabonu**

Doctor in chemistry, Chief Research Scientist

Institute of General and Inorganic Chemistry

Uzbekistan Academy of Sciences

Republic of Uzbekistan, Tashkent

**Guro Vitaliy**

Doctor in chemistry, Professor

Institute of General and Inorganic Chemistry

Uzbekistan Academy of Sciences

Republic of Uzbekistan, Tashkent

**Dadakhodjaev Abdulla**

Doctor of Technical Sciences, Professor

Tashkent State Technical University

Republic of Uzbekistan, Tashkent

## Аннотация

В работе исследованы физико-химические закономерности очистки сульфата меди от примеси никеля методом перекристаллизации, в системе  $\text{CuSO}_4\text{--NiSO}_4\text{--H}_2\text{O}$ . Актуальность исследования обусловлена необходимостью повышения качества медного купороса, получаемого из технологических растворов медеплавильного производства АО «Алмалыкский ГМК», а также заинтересованностью в новом товарном продукте – никелевом купоросе, выделяемом из никельсодержащих маточных растворов кристаллизации медного купороса. Изучены закономерности распределения никеля между жидкой и твердой фазами при последовательной перекристаллизации сульфата меди. Исследованы растворимости системы «сульфат меди – сульфат никеля – вода», определены области кристаллизации гидратных форм сульфатов меди и никеля, установлены условия эффективного разделения компонентов. Показано, что двукратная перекристаллизация обеспечивает значительное снижение примеси никеля в кристаллах медного купороса, с накоплением его в маточном растворе. Предложенный подход способствует повышению степени очистки медного купороса от примесей, снижению потерь ценного компонента рудного медного концентрата – никеля, более эффективному использованию вторичных сырьевых ресурсов горно-металлургического производства.

## Abstract

This study investigates the physicochemical principles of copper sulfate purification from nickel impurities by recrystallization in the  $\text{CuSO}_4\text{--NiSO}_4\text{--H}_2\text{O}$  system. The research is motivated by the need to improve the quality of copper sulfate produced from process solutions at JSC Almalyk Mining and Metallurgical Complex (AMMC) and by the growing demand for a new commercial product—nickel sulfate—recovered from nickel-enriched mother liquors generated during copper sulfate crystallization. The distribution of nickel between the liquid and solid phases during successive recrystallization of copper sulfate was investigated. The solubility relationships in the  $\text{CuSO}_4\text{--NiSO}_4\text{--H}_2\text{O}$  system were studied, the crystallization regions of hydrated copper and nickel sulfates were determined, and the conditions required for efficient separation of the components were established. The results demonstrate that double recrystallization significantly reduces the nickel content in copper sulfate crystals while promoting its accumulation in the mother liquor. The proposed approach improves the purification efficiency of copper sulfate, minimizes the loss of nickel as a valuable component of copper concentrates, and enhances the utilization of secondary raw materials in the mining and metallurgical industry.

**Ключевые слова:** медный и никелевый купорос, перекристаллизация, растворимость, фазовые равновесия, маточный раствор, очистка, цветная металлургия.

**Keywords:** copper sulfate, nickel sulfate, recrystallization, solubility, phase equilibria, motherliquor, purification, non-ferrous metallurgy.

---

**Библиографическое описание:** Физико-химические основы очистки сульфата меди от никеля методом его перекристаллизации // Universum: химия и биология : электрон. научн. журн. Фузайлова Ф.Н. [и др.]. 2026. 8(146). URL: <https://7universum.com/ru/nature/archive/item/23141>

## Введение

Медный купорос  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  – один из востребованных продуктов цветной металлургии, он используется в сельском хозяйстве, животноводстве, химической промышленности, гальванотехнике и других отраслях. Качество его определяется содержанием основных и примесных компонентов, среди которых особое место занимает никель, токсичный в отношении биологических объектов, вредный для ряда технологических процессов [1–3]. При этом, сам никель не менее широко востребован.

В настоящее время для извлечения никеля из медьсодержащих растворов применяются различные гидрометаллургические методы, включая осаждение, экстракцию, ионный обмен, сорбцию, мембранные технологии [4–7]. Однако, большинство известных технологий характеризуется высокой стоимостью расходных материалов, сложностью аппаратного оформления, недостаточной эффективностью при переработке растворов с низким содержанием никеля [8]. Одним из наиболее перспективных способов разделения соединений меди и никеля является перекристаллизация, основанная на различной растворимости сульфатов меди и никеля.

Эффективность процесса определяется фазовыми равновесиями системы  $\text{CuSO}_4$ – $\text{NiSO}_4$ – $\text{H}_2\text{O}$ , температурным режимом кристаллизации и распределением примесных компонентов между жидкой и твердой фазами [9–11]. Несмотря на ранее проведенные исследования, посвященные переработке смешанных медно-никелевых растворов, вопрос выбора оптимальных условий перекристаллизации и накопления никеля в маточных растворах остается недостаточно изученным. Интерес представляет разработка технологии, позволяющей одновременно получать высокочистый медный купорос и концентрировать никель для его извлечения в виде никелевого купороса [12–13].

**Целью** работы является исследование физико-химических закономерностей очистки сульфата меди от примеси никеля методом перекристаллизации в системе  $\text{CuSO}_4$ – $\text{NiSO}_4$ – $\text{H}_2\text{O}$ , а также определение условий эффективного разделения меди и никеля на основе анализа растворимости и фазовых равновесий.

## Материалы и методы исследования

Объектом исследования являлись растворы и продукты перекристаллизации сульфата меди, полученные из технологических растворов медно-купоросного цеха медеплавильного производства АО «Алмалыкский ГМК». Объект исследования – медный купорос ( $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ), маточный раствор его перекристаллизации, содержащий примесные ионы никеля. Оценивалась возможность его очистки медного методом перекристаллизации и определения условий концентрирования никеля в маточных растворах.

Перекристаллизацию выполняли методом растворения навески сульфата меди в дистиллированной воде при температуре 90–95 °С до получения насыщенного раствора. После полного растворения раствор охлаждали до 20–25 °С при естественных условиях с последующей выдержкой до завершения процесса кристаллизации. Образовавшиеся кристаллы отделяли от маточного раствора вакуумной фильтрацией, высушивали при комнатной температуре и использовали для последующего анализа. Для повышения степени очистки выполняли последовательную двукратную перекристаллизацию. Такой режим

обеспечивает эффективное снижение содержания Ni-примесей в кристаллах медного купороса за счет различий в распределении компонентов между жидкой и твердой фазами. Изучение фазовых равновесий системы  $\text{CuSO}_4\text{--NiSO}_4\text{--H}_2\text{O}$  проводили изотермическим методом. Равновесные состояния достигались при непрерывном перемешивании растворов в термостатируемой ячейке с поддержанием температуры с точностью  $\pm 0,1$  °C. Составы жидкой и твердой фаз определяли методом физико-химического анализа по Скрейнемакерсу [14 – 15], что позволило установить области кристаллизации и распределение компонентов в исследуемой системе.

Концентрацию никеля в исходных растворах, маточных растворах и продуктах перекристаллизации определяли методом атомно-абсорбционной спектроскопии (AAS) с использованием спектрометра Perkin Elmer 3030B. Для оценки эффективности разделения меди и никеля рассчитывали изменение концентрации никеля после каждой стадии перекристаллизации и степень его накопления в маточном растворе.

Полученные экспериментальные данные обрабатывали методами математической статистики. По результатам исследований строили диаграммы растворимости, анализировали распределение никеля между жидкой и твердой фазами и оценивали влияние условий перекристаллизации на степень очистки сульфата меди.

### Результаты и обсуждение

Для изучения фазовых равновесий системы «сульфат меди – сульфат никеля – вода» изотермическим методом определены составы жидких и твердых фаз при 25 и 75 °C. Полученные данные позволили построить диаграммы растворимости и установить области кристаллизации отдельных гидратных форм сульфатов меди и никеля. В **Таблице 1** приведены результаты исследования растворимости системы при 25 °C. Из них видно, что исследуемая система относится к простому эвтоническому типу. В области низких концентраций  $\text{CuSO}_4$  преимущественно кристаллизуется в форме  $\text{NiSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ , тогда как при увеличении содержания сульфата меди происходит переход к области кристаллизации  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ . Между указанными областями располагается эвтоническая точка, соответствующая равновесию двух твердых фаз с насыщенным раствором. После обработки экспериментальных данных построена диаграмма растворимости системы при 25 °C (рис. 1), на которой четко прослеживаются поля первичной кристаллизации  $\text{NiSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  и  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ . Диаграмма показывает отсутствие образования новых соединений и подтверждает эвтонический характер исследуемой системы.

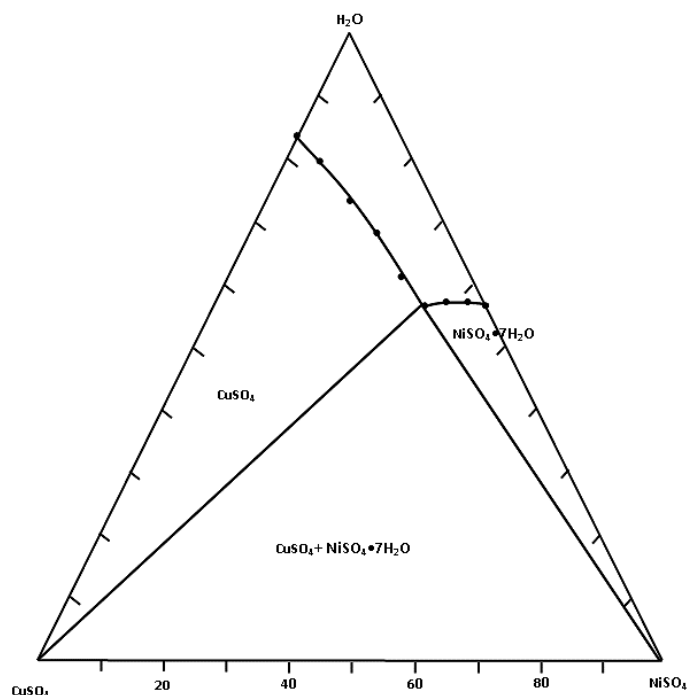
**Таблица 1.**

**Растворимость системы  $\text{CuSO}_4\text{--NiSO}_4\text{--H}_2\text{O}$  при 25 °C**

| № п/п | Состав жидкой фазы, % |                | Состав твердого остатка, % |                | Твердая фаза                              |
|-------|-----------------------|----------------|----------------------------|----------------|-------------------------------------------|
|       | Сульфат меди          | Сульфат никеля | Сульфат Меди               | Сульфат никеля |                                           |
| 1     | -                     | 36,0           | -                          | 83,92          | $\text{NiSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ |
| 2     | 1,54                  | 20,21          | 0,6                        | 65,8           | То же                                     |
| 3     | 2,35                  | 22,23          | 0,81                       | 71,62          | “                                         |

|    |       |       |       |       |                                                                                     |
|----|-------|-------|-------|-------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| 4  | 4,92  | 30,42 | 1,31  | 72,41 | “                                                                                   |
| 5  | 4,98  | 38,1  | 1,33  | 71,86 | “                                                                                   |
| 6  | 5,0   | 38,2  | 10,79 | 72,38 | “                                                                                   |
| 7  | 5,1   | 38,3  | 21,86 | 61,98 | “                                                                                   |
| 8  | 6,56  | 33,2  | 23,21 | 62,81 | “                                                                                   |
| 9  | 9,84  | 28,42 | 23,24 | 60,76 | “                                                                                   |
| 10 | 15,92 | 24,96 | 24,85 | 61,62 | “                                                                                   |
| 11 | 20,10 | 24,36 | 25,61 | 61,28 | “                                                                                   |
| 12 | 20,11 | 24,30 | 37,67 | 55,48 | То же                                                                               |
| 13 | 20,13 | 24,26 | 48,96 | 43,36 | То же                                                                               |
| 14 | 30,38 | 18,45 | 50,79 | 42,85 | “                                                                                   |
| 15 | 41,25 | 13,46 | 51,32 | 39,96 | “                                                                                   |
| 16 | 53,98 | 12,27 | 53,91 | 41,96 | “                                                                                   |
| 17 | 66,01 | 12,20 | 56,10 | 40,20 | “                                                                                   |
| 18 | 66,02 | 12,19 | 72,42 | 23,21 | $\text{NiSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O} + \text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ |
| 19 | 66,04 | 12,18 | 86,95 | 4,61  | $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$                                           |
| 20 | 63,41 | 10,21 | 87,61 | 3,61  | “                                                                                   |
| 21 | 60,08 | 7,20  | 85,1  | 2,86  | “                                                                                   |
| 22 | 57,41 | 4,86  | 83,45 | 1,98  | “                                                                                   |
| 23 | 19,2  | -     | 92,36 | -     | “                                                                                   |

Аналогичные исследования выполнены при температуре 75 °С. Полученные данные свидетельствуют о существенном изменении положения границ фазовых областей. С повышением температуры расширяется область кристаллизации пентагидрата сульфата меди и уменьшается область устойчивости гидратов сульфата никеля. При этом эвтонический раствор обогащается  $\text{CuSO}_4$ , а содержание  $\text{NiSO}_4$  снижается. Эти изменения свидетельствуют о возможности управления процессом разделения компонентов посредством выбора температурного режима кристаллизации

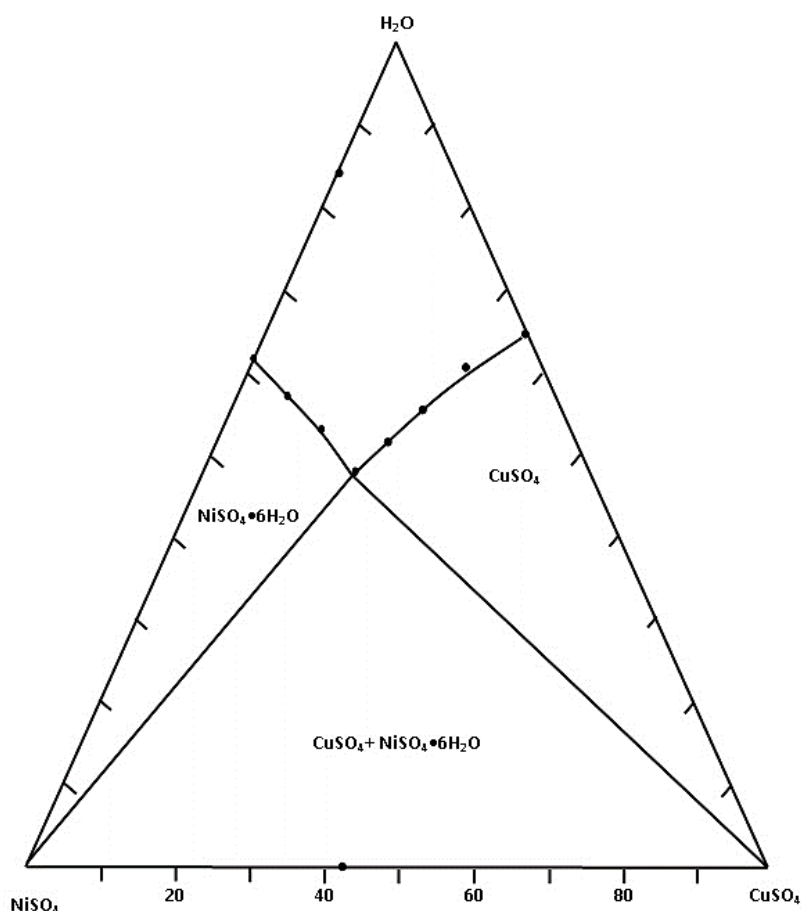


**Рисунок 1. Изотерма растворимости системы  $\text{CuSO}_4\text{--NiSO}_4\text{--H}_2\text{O}$  при 25 °C**

**Таблица 2.**

**Растворимость системы  $\text{CuSO}_4\text{--NiSO}_4\text{--H}_2\text{O}$  при 75 °C**

| № п/п | Состав жидкой фазы, % |                | Состав твердой фазы, % |                | Твердая фаза                                                                        |
|-------|-----------------------|----------------|------------------------|----------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
|       | Сульфат меди          | Сульфат никеля | Сульфат меди           | Сульфат никеля |                                                                                     |
| 1     | -                     | 4,4            | -                      | 63,95          | $\text{NiSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$                                           |
| 2     | 2,38                  | 8,41           | 0,53                   | 52,41          | то же                                                                               |
| 3     | 4,21                  | 13,24          | 0,79                   | 53,20          | “                                                                                   |
| 4     | 4,32                  | 13,26          | 11,83                  | 51,98          | “                                                                                   |
| 5     | 10,02                 | 0,61           | 12,97                  | 51,46          | “                                                                                   |
| 6     | 15,62                 | 0,60           | 13,61                  | 51,24          | “                                                                                   |
| 7     | 20,25                 | 1,98           | 14,28                  | 50,96          | “                                                                                   |
| 8     | 24,79                 | 6,65           | 15,22                  | 49,61          | “                                                                                   |
| 9     | 24,80                 | 6,66           | 24,76                  | 46,97          | “                                                                                   |
| 10    | 24,81                 | 6,67           | 32,32                  | 39,36          | “                                                                                   |
| 11    | 28,83                 | 4,56           | 33,12                  | 40,92          | “                                                                                   |
| 12    | 35,10                 | 2,26           | 34,41                  | 39,10          | “                                                                                   |
| 13    | 42,0                  | 0,81           | 36,18                  | 35,47          | “                                                                                   |
| 14    | 48,20                 | 0,56           | 37,16                  | 36,96          | “                                                                                   |
| 15    | 54,93                 | 1,43           | 38,95                  | 36,29          | $\text{NiSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O} + \text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ |
| 16    | 54,95                 | 1,49           | 63,67                  | 22,41          | $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$                                           |
| 17    | 54,96                 | 1,58           | 94,01                  | 0,56           | “                                                                                   |
| 18    | 53,39                 | -              |                        |                | “                                                                                   |
| 19    | 59,41                 | 4,54           | 83,88                  | 1,98           | “                                                                                   |
| 20    | 28,32                 | -              | 92,78                  | -              | “                                                                                   |



**Рисунок 2. Изотерма растворимости системы  $\text{CuSO}_4\text{--NiSO}_4\text{--H}_2\text{O}$  при 75 °C**

Анализ экспериментальных данных, представленных в таблице 2, показывает, что при температуре 75 °C сохраняется эвтонический характер системы  $\text{CuSO}_4\text{--NiSO}_4\text{--H}_2\text{O}$ , однако происходит существенное изменение положения границ областей кристаллизации. Повышение температуры сопровождается увеличением растворимости сульфата меди и изменением состава насыщенных растворов, что оказывает непосредственное влияние на распределение компонентов между жидкой и твердой фазами.

Как видно из рисунка 2, область первичной кристаллизации  $\text{CuSO}_4\cdot 5\text{H}_2\text{O}$  становится значительно шире по сравнению с изотермой при 25 °C, тогда как область устойчивости гидратов сульфата никеля уменьшается. Эвтоническая точка смещается в сторону более высоких концентраций сульфата меди, что свидетельствует об изменении фазового равновесия под влиянием температуры.

Сравнение изотерм растворимости при 25 и 75 °C показывает, что повышение температуры способствует более эффективному разделению меди и никеля. При последующем охлаждении насыщенных растворов преимущественно кристаллизуется  $\text{CuSO}_4\cdot 5\text{H}_2\text{O}$ , тогда как большая часть никеля остается в маточном растворе. Такая закономерность является физико-химической основой процесса очистки медного купороса методом перекристаллизации и обеспечивает накопление никеля в жидкой фазе.

Полученные результаты подтверждают, что температурный режим является одним из основных факторов управления процессом кристаллизации в системе  $\text{CuSO}_4\text{--NiSO}_4\text{--H}_2\text{O}$ . Оптимальный выбор температуры позволяет повысить степень очистки медного купороса от никеля и создать благоприятные условия для последующего извлечения никеля из маточных растворов

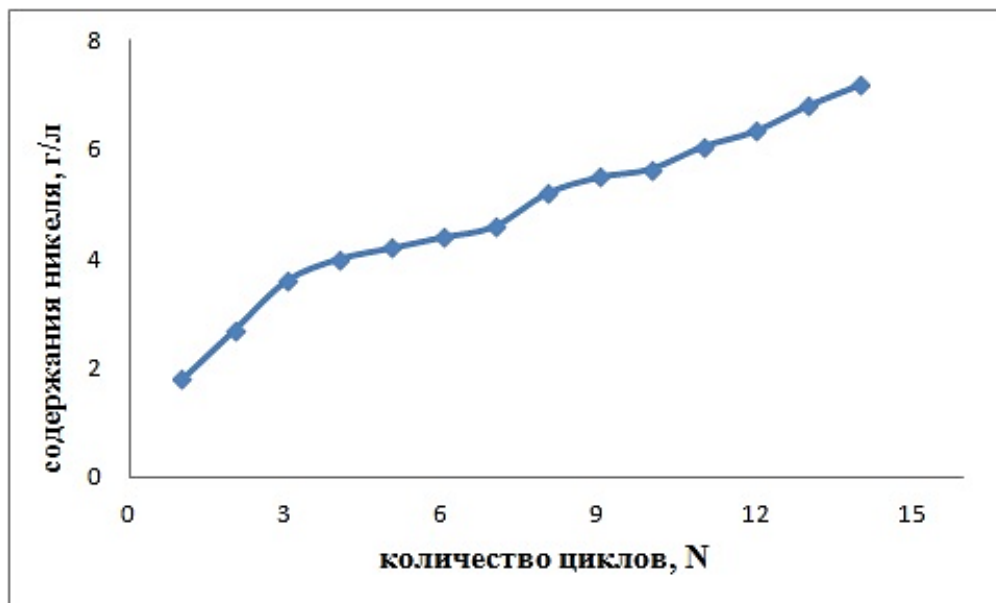


Рисунок 3. Зависимость концентрации никеля в маточных растворах от числа циклов перекристаллизации

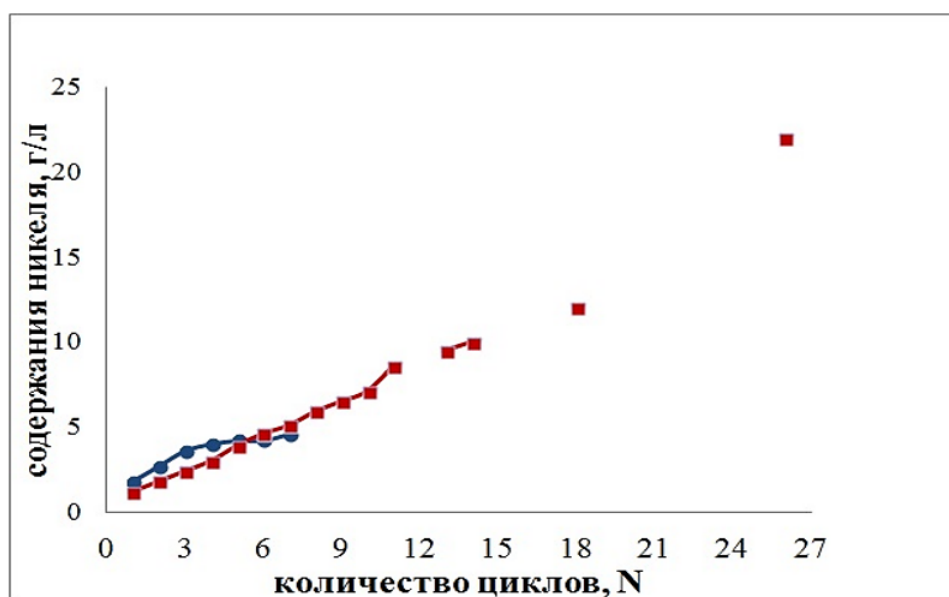


Рисунок 4. Экстраполяция накопления никеля в маточном растворе в зависимости от числа циклов перекристаллизации. Обозначение:

—♦— теория; —■— эксперимент

Для оценки эффективности процесса перекристаллизации построена зависимость накопления никеля в маточных растворах от числа циклов перекристаллизации (рис. 3). Из представленных данных следует, что концентрация никеля возрастает практически линейно, что подтверждает возможность его последующего извлечения в виде товарного сульфата никеля.

Для прогнозирования накопления никеля при дальнейшем проведении процесса, выполнена экстраполяция экспериментальных данных (рис. 4). Полученная зависимость показывает, что при увеличении числа циклов перекристаллизации, концентрация никеля в маточном растворе продолжает возрастать и может достигать 20–22 г/л. Это создает предпосылки для последующего выделения никеля в виде кристаллического сульфата никеля без существенных потерь меди и подтверждает эффективность предложенной технологической схемы.

Сопоставление результатов исследования растворимости с данными по перекристаллизации показывает, что расширение области кристаллизации  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  при повышенной температуре обеспечивает более эффективное разделение меди и никеля. Вследствие этого, никель преимущественно остается в жидкой фазе и постепенно концентрируется в маточном растворе: выявленная закономерность является основой предложенной технологической схемы переработки маточных растворов медного купороса.

### Заключение

В результате проведенных исследований изучены фазовые равновесия в системе «сульфат меди – сульфат никеля – вода» при 25 и 75 °С и построены соответствующие изотермы растворимости. Установлено, что исследуемая система относится к простому эвтоническому типу и не образует новых химических соединений. Определены области кристаллизации  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  и  $\text{NiSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ , а также положение эвтонических точек, характеризующих равновесие между жидкой и твердой фазами.

Показано, что повышение температуры приводит к расширению области кристаллизации пентагидрата сульфата меди и уменьшению области кристаллизации гидратов сульфата никеля. При этом эвтонические растворы обогащаются сульфатом меди, а содержание сульфата никеля в них снижается, что создает благоприятные условия для селективного разделения компонентов методом кристаллизации.

Сопоставление полученных результатов с данными по перекристаллизации медного купороса показало, что установленный характер фазовых равновесий объясняет преимущественную кристаллизацию  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  и накопление никеля в маточных растворах. Это подтверждает возможность эффективной очистки медного купороса от примесей никеля и последующего извлечения никеля в виде товарного сульфата никеля.

Полученные результаты могут служить основой для совершенствования технологии переработки растворов производства медного купороса на АО «Алмалыкский ГМК», повышения качества готовой продукции и получения товарного никелевого купороса.

### Список литературы

1. ГОСТ 19347–99. Купорос медный. Технические условия.

2. Гуро В.П. Гидрометаллургия никеля из полиметаллического меднорудного и техногенного сырья в Узбекистане // *Узбекский химический журнал*. 2008. – 2008. – № 4.
3. Дадаходжаев А.Т., Маматалиев Н.Н. Способы извлечения никеля из отходов производств и его применение // *Universum: технические науки*. – 2019. – № 4.
4. Дудник А.Л., Хасполодов В.Ш., Аранович В.Л. и др. Способ утилизации сбросных маточных растворов производства медного купороса: Патент Республики Узбекистан № 5408. 1998.
5. Станковић С., Стопић С., Сокић М., Марковић Б., Фридрих Б. Stanković S., Stopić S., Sokić M., Marković B., Friedrich B. Review of the Past, Present, and Future of the Hydrometallurgical Production of Nickel and Cobalt from Lateritic Ores // *Metallurgical and Materials Engineering*. – 1999. – Т. 1999. – DOI: 10.1007/s10953-008-9353-4.
6. Хасполодов В.Ш., Гуро В.П., Ибрагимова М.А. Выделение никелевого купороса с попутным извлечением соли Шевереля из растворов утилизации электролита рафинирования меди // *Узбекский химический журнал*,. – 2007. – № 2.
7. Якубов М.М., Холикулов Д.Б., Болтаев О.Н., Абдукодиров А.А. Возможности извлечения ценных компонентов из маточных растворов, образованных при производстве медного купороса в условиях АО «Алмалыкский ГМК», *Journal of Advances in Metallurgy and Engineering Technology*. 2020. Vol. 2. No. 2. P. 67–73.
8. Arslanoğlu H., Yaraş A. Recovery of molybdenum, cobalt and nickel from spent hydrodesulphurization catalyst through oxidizing roast followed by sodium persulfate leaching [Электронный ресурс]. // *Sustainable Materials and Technologies*. URL: <https://doi.org/> (дата обращения: 02.07.2026).
9. Choi K.H., Jang J., Bedrossian S., Azimi G. Crystallization of nickel sulfate and its purification process: towards efficient production of nickel-rich cathode materials for lithium-ion batteries // *RSC Advances*, 2023, V. 13, No. 41. – 2023. – № 41. – DOI: 10.1039/D3RA04280D.
10. Choi K.H., Jang J., Bedrossian S., Azimi G. Impact of Impurities on Nickel Sulfate Crystallization and Strategies for Removal: Advancing Toward Battery-Grade Nickel Sulfate Production // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. – 2025. – DOI: 10.1021/acs.iecr.4c03711.
11. Kinnunen P., Riihimäki T., Kinnunen K., Salo M., Heikola T., Mäkinen J. Process Design for Direct Production of Battery Grade Nickel Sulfate // *Journal of Sustainable Metallurgy*. – 2024. – № 3. – DOI: 10.1007/s40831-024-00864-9.
12. Meshram P. Abhilash, Pandey B.D. Advanced review on extraction of nickel from primary and secondary sources // *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. – 2019. – № 3. – DOI: 10.1080/08827508.2018.1514300.
13. Perkins D., Mogk D. Method of Schreinemakers: A Geometric Approach to Constructing Phase Diagrams. Carleton College. 2007.

## References

1. [Copper Sulfate. Technical Specifications] (In Russ.)

2. [Hydrometallurgy of Nickel from Polymetallic Copper Ore and Technogenic Raw Materials in Uzbekistan] // *Uzbekskij khimicheskij zhurnal*. 2008. – 2008. – № 4.
3. Dadakhodzhaev A.T., Mamataliev N.N. [Methods of Nickel Extraction from Industrial Waste and Its Application] // *Universum: tekhnicheskie nauki*. – 2019. – № 4.
4. Dudnik A.L., Khaspoladov V.Sh., Aranovich V.L. i dr. [Method for Utilization of Spent Mother Liquors from Copper Sulfate Production: Patent of the Republic of Uzbekistan No. 5408. 1998] (In Russ.)
5. Станковић С., Стопић С., Сокић М., Марковић Б., Фридрих Б. [Review of the Past, Present, and Future of the Hydrometallurgical Production of Nickel and Cobalt from Lateritic Ores] // *Metallurgical and Materials Engineering*. – 1999. – Т. 1999. – DOI: 10.1007/s10953-008-9353-4.
6. Khaspoladov V.Sh., Guro V.P., Ibragimova M.A. [Isolation of Nickel Sulfate with Concurrent Extraction of Schwertes Salt from Solutions of Copper Refining Electrolyte Utilization] // *Uzbekskij khimicheskij zhurnal*,. – 2007. – № 2.
7. Yakubov M.M., Kholikulov D.B., Boltaev O.N., Abdukodirov A.A. [Possibilities of Extracting Valuable Components from Mother Liquors Generated During Copper Sulfate Production at JSC &#x27;Almalyk State Mining and Metallurgical Combine&#x27;; Journal of Advances in Metallurgy and Engineering Technology. 2020. Vol. 2. No. 2. P. 67–73] (In Russ.)
8. Arslanoğlu H., Yaraş A. Recovery of molybdenum, cobalt and nickel from spent hydrodesulphurization catalyst through oxidizing roast followed by sodium persulfate leaching // *Sustainable Materials and Technologies*. – URL: <https://doi.org/> (accessed 07.08.2026) (дата обращения: 02.07.2026).
9. Choi K.H., Jang J., Bedrossian S., Azimi G. Crystallization of nickel sulfate and its purification process: towards efficient production of nickel-rich cathode materials for lithium-ion batteries // *RSC Advances*, 2023, V. 13, No. 41. – 2023. – № 41. – DOI: 10.1039/D3RA04280D.
10. Choi K.H., Jang J., Bedrossian S., Azimi G. Impact of Impurities on Nickel Sulfate Crystallization and Strategies for Removal: Advancing Toward Battery-Grade Nickel Sulfate Production // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. – 2025. – DOI: 10.1021/acs.iecr.4c03711.
11. Kinnunen P., Riihimäki T., Kinnunen K., Salo M., Heikola T., Mäkinen J. Process Design for Direct Production of Battery Grade Nickel Sulfate // *Journal of Sustainable Metallurgy*. – 2024. – № 3. – DOI: 10.1007/s40831-024-00864-9.
12. Meshram P. Abhilash, Pandey B.D. Advanced review on extraction of nickel from primary and secondary sources // *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. – 2019. – № 3. – DOI: 10.1080/08827508.2018.1514300.
13. Perkins D., Mogk D. Method of Schreinemakers: A Geometric Approach to Constructing Phase Diagrams. Carleton College. 2007.