

**Золотарьова О.В.**

<https://orcid.org/0000-0002-3045-8229>

Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля

## ДОСЛІДЖЕННЯ ВИРОБНИЦТВА СУЛЬФАТНОЇ КИСЛОТИ З РОЗРОБКОЮ СТАДІЇ ВИПАЛУ СУЛЬФУРВІСНОЇ СИРОВИНИ

*Актуальність наукової роботи зумовлена необхідністю модернізації хіміко-технологічних систем виробництва сульфатної кислоти в умовах зростання попиту на мінеральні добрива та потреби у підвищенні енергоефективності промислових агрегатів. Традиційні схеми випалу сірчаного колчедану потребують оптимізації через значні енерговитрати та високе екологічне навантаження. Пошук технічних рішень, що дозволяють інтенсифікувати процес у печах киплячого шару, забезпечити комплексну утилізацію відходів та знизити собівартість продукту, є стратегічно важливим завданням для хімічної галузі України в контексті ресурсозбереження та екологічної безпеки.*

*В роботі на підставі прийнятого технічного рішення були внесені зміни в технологічну схему виробництва сульфатної кислоти, виконаний розрахунок матеріального і теплового балансів стадії випалу сірчаного колчедана, а також конструктивний розрахунок печі киплячого шару, вибране технологічне обладнання розроблюваної стадії.*

*Запропонована система автоматизації стадії випалу колчедану дозволяє проводити технологічний процес в оптимальному режимі, що забезпечує стабільну концентрацію діоксиду сірки в обпалювальному газі та дозволяє отримувати високоякісний кінцевий продукт.*

*Виробництво сульфатної кислоти супроводжується утворенням значної кількості твердих відходів у вигляді огарку та селенових шлаків. В проекті були детально розглянуті сучасні способи утилізації вказаних відходів, що дозволяє реалізувати принципи маловідходного виробництва. Завдяки впровадженню досконалих систем очищення, викиди відходних газів ( $SO_2$  та  $SO_3$ ) мінімізовані до меж допустимих санітарних норм. Організація охорони праці та техніки безпеки на проектованому виробництві дозволяє повністю забезпечити безпеку, збереження здоров'я та працездатність персоналу.*

*Нове технічне рішення, запропоноване в роботі, дасть можливість знизити собівартість готової продукції на 4,79%, при цьому прибуток на одиницю продукції збільшиться на 3,9%. Річний економічний ефект від зниження собівартості складатиме 19705,80 тис. грн, а капітальні витрати на модернізацію окупляться за 0,01 року, що підтверджує високу інвестиційну важливість проекту.*

**Ключові слова:** сульфатна кислота, сірчаний колчедан, випал, піч киплячого шару, каталізатор.

**Постановка проблеми.** Основним споживачем сульфатної кислоти є виробництво мінеральних добрив (суперфосфату, амоній сульфату), а також виробництво органічних проміжних сполук і барвників, вибухових речовин. Вона також використовується в нафтовій (для очистки нафтопродуктів від сполук сульфуру й неграничних органічних сполук), металообробній (для травлення металів), текстильній (у виробництві штучного волокна, для відбілювання тканин), шкіряній, деревообробувальній (при переробки деревини в етиловий спирт) промисловості, кольоровій металургії (при одержанні міді, цинку, кобальту, нікелю та ін.). Важливою властивістю сульфатної кислоти є її гігроскопічність – здатність добре поглинати

воду, що використовується в промисловості для сушки газу, а також для концентрування нітратної кислоти [1].

На сьогоднішній день сульфатну кислоту одержують двома способами: нітрозним (баштовим), що існує більше 200 років, і контактним, освоєним у промисловості наприкінці XIX і початку XX століття.

Першою стадією виробництва сульфатної кислоти за будь-яким способом є одержання сульфур (IV) оксиду (сірчистий газ) при випалі сульфурвмісної сировини. Після очищення сульфур (IV) оксид окисляється до сульфур (VI) оксиду (сірчаний газ), який поєднуючись із водою, утворює сульфатну кислоту. Реакція окиснення  $SO_2$  в  $SO_3$



протікає дуже повільно, тому її прискорюють або шляхом застосування каталізатора (контактний спосіб), або шляхом використання оксидів нітрогену як передавачів кисню (нітрозний спосіб) [1].

У нітрозному способі для окиснення  $\text{SO}_2$  застосовують еквімолекулярну суміш  $\text{NO}$  і  $\text{NO}_2$ .

Відаючи свій кисень сульфур (IV) оксиду,  $\text{NO}_2$  і  $\text{N}_2\text{O}_3$  відновлюються до оксиду нітрогену  $\text{NO}$ . Оксид нітрогену окисляється далі киснем повітря знову до  $\text{NO}_2$ , і суміш  $\text{NO}$  і  $\text{NO}_2$  повертається в процес.

В дослідженні обирається контактний спосіб виробництва за системою ПК-ПА, оскільки дає можливість одержувати чисту та концентровану кислоту, автоматизувати технологічний процес, знизити вміст оксидів сульфуру в вихлопних газах до гранично допустимих концентрацій.

Сировиною для одержання сульфур (IV) оксиду, а отже, і для виробництва сульфатної кислоти, є елементарна сірка, сірчаний колчедан, гідроген сульфур, відхідні гази кольорової та чорної металургії [3].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Проблеми дослідження виробництва сульфатної кислоти з розробкою стадії випалу сульфурвмісної сировини розглядалися у роботах Іванченко Л. В., Кожухар В. Я., Концевой А. Л., Денисюк Р. О. та інших вчених. Однак і сьогодні під час проведення експерименту, дана проблема викликає багато запитань.

**Постановка завдання.** В роботі пропонується з метою інтенсифікації масо- та теплообміну процес випалу сірчаного колчедану проводити при швидкості газового потоку вище другої критичної швидкості псевдозрідження з пересиченням газового потоку над киплячим шаром циркулюючим огарком, що створює особливі гідродинамічні умови.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Новим технічним рішенням пропонується випал колчедану проводити при швидкості газового потоку вище другої критичної швидкості псевдозрідження з пересиченням газового потоку над киплячим шаром циркулюючим огарком, що створює особливі гідродинамічні умови, прискорює масо- та теплообмін і дає можливість проводити процес при  $450\text{-}550^\circ\text{C}$ , що попереджує шлакування матеріалу і підвищує надійність і зносостійкість пічних агрегатів.

Крім того, внаслідок сприятливих умов масообміну при швидкостях вище другої критичної стає можливим вести випал при надлишку кисню в дутті не вище 1,04 зі ступенем вигорання сірки

не менше 98% при  $750\text{-}900^\circ\text{C}$  і отримувати при цьому огарок в формі магнетиту  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , що можливість використовувати піритні огарки в металургії без додаткового відновлювального випалу.

Розглянемо технологічну схему виробництва сульфатної кислоти контактним способом за методом ПК-ПА з сірчаного колчедан. [4].

Флотаційний сірчаний колчедан через дозатор поступає в піч киплячого шару. Повітря на випал подається в піч знизу. Отриманий сульфур (IV) оксид, що містить 13%об.  $\text{SO}_2$ , при температурі  $\sim 700^\circ\text{C}$  подають у котел-утилізатор, де він охолоджується до температури  $420^\circ\text{C}$ . При цьому одержують енергетичну пару тиском 4 МПа і температурою  $450^\circ\text{C}$ , а також відбувається часткове очищення газу від огаркового пилу. Подальше очищення газу здійснюється в циклонах і в сухих електрофільтрах. Огарок, який уловлений в циклоні, повертається в киплячий шар печі. Це створює особливі гідродинамічні умови та прискорює масо- та теплообмін, а огарок печі та з котла-утилізатора, циклона й електрофільтра видаляється системою транспорту.

Очищення сульфур (IV) оксиду від селену, арсену та інших домішок проводиться на стадії очистки, що складається з двох промивних башт, двох мокрих електрофільтрів (поз. 8, 9) і сушильної башти.

Перша порожниста промивна башта працює в випарному режимі: циркулююча кислота охолоджує газ, при цьому тепло витрачається на випаровування води з кислоти, що поступає на зрошування. Концентрація зрошувальної кислоти в першій башті складає 35-45%мас.  $\text{H}_2\text{SO}_4$  і підтримується на цьому рівні за рахунок передачі 5-10%-вої  $\text{H}_2\text{SO}_4$  з другої промивної башти. Кислота з другої башти поступає в збірник кислоти і після охолодження повертається на зрошування.

Після другої промивної башти газ проходить послідовно дві пари електрофільтрів, потім сушильну башту, що зрошується 93-94%-вою  $\text{H}_2\text{SO}_4$  при  $28\text{-}30^\circ\text{C}$ . За рахунок поглинання пари води з газу зрошувальна кислота розбавляється та нагрівається, тому для зниження температури, її охолодження проводять в повітряному холодильнику. Для підтримування концентрації кислоти до неї додають кислоту з моногідратного абсорбера й знов подають на зрошування.

Перед сушильною баштою сульфур (IV) оксид розбавляють повітрям до вмісту в ньому 9%об.  $\text{SO}_2$  відповідно до технологічного режиму роботи контактного апарату.

Після сушильної башти сульфур (IV) оксид при 28-30°C проходить бризкоуловлювача і нагрівається в трьох трубчастих теплообмінниках і при температурі 420-440°C поступає на перший шар контактного апарату, де окислюється на 73,8-74%; його температура підвищується до 600°C. Пройшовши теплообмінник, газ поступає на другий шар каталізатора, де ступінь контактування досягає 86%, а температура газу зростає від 465 до 514°C. В теплообміннику температура газу знов знижується до 450°C і він направляється на третій шар контактного апарату. Тут ступінь окиснення SO<sub>2</sub> в SO<sub>3</sub> досягає 94-94,5%, а температура підвищується до 465-470°C.

Пройшовши теплообмінники, газ при температурі 100°C поступає на абсорбцію першого ступеня: спочатку в олеумний абсорбер, потім в моногідратний. Після моногідратного абсорбера й фільтра-бризкоуловлювача газ підігрівається до 430°C в системі теплообмінників і поступає на четвертий шар каталізатора, причому концентрація в ньому SO<sub>2</sub> складає 0,77-0,84% об. Тут ступінь окиснення SO<sub>2</sub> досягає 80%. В теплообміннику температура газу знижується від 449 до 409°C. На п'ятому шарі окиснення SO<sub>2</sub> досягає 87%. Загальний ступінь контактування при цьому дорівнює 99,8%.

Після п'ятого шару контактного апарату газ при температурі 409°C, пройшовши теплообмінники, віддає своє тепло і поступає на абсорбцію другого ступеня в моногідратному абсорбері. Частина сульфатної кислоти передається в збірник кислоти. Непоглинений газ, що містить 0,02-0,03% об. SO<sub>2</sub>, викидається в атмосферу через вихлопну трубу [3].

Випал сірчаного колчедану здійснюється в печі киплячого шару. Піч має циліндричну форму з розширенням в верхній частині. Сталевий корпус печі футерований шамотною і діатомовою цеглою. Піч має завантажувальну камеру – форкамеру, яка постачається провальною і безпровальною решітками. Застосування форкамери попереджає забивання крупними кусками колчедану поду печі і дає можливість вертикально розташувати спускную трубу від тарілчастого живильника (для запобігання зависання в ній колчедану).

Под печі складається з безпровальної решітки, яка частково заходить у форкамеру, і провальної колосникової решітки. Безпровальна решітка представляє собою сталевий перфорований лист, залитий жаротривким бетоном на висоту 120 мм і заармований двома рядами круглої сталі. В отворах безпровальної решітки і колосниках проваль-

ної решіток встановлені повітряні сопла. За допомогою розподільної решітки, що встановлюється в повітряному коробі, досягається рівномірне розподілення повітря по перетину. Повітря під подину печі подається трьома потоками: під провальну і безпровальну решітки форкамери і безпровальну решітку поду.

Для інтенсифікації кипіння вологого й більш важкого, ніж огарок, колчедану під колосникову решітку подається повітря в 1,8-2 рази більше, ніж у безпровальну решітку.

Огарок видаляють із печі через бункер форкамери із протилежної сторони печі.

Для розпалювання печі над киплячим шаром похило до горизонту встановлені газові пальники.

Над решіткою в футерівці є отвори для установки охолоджувальних елементів в киплячому шарі. Охолоджувальні елементи представляють собою труби з вуглецевої сталі, по яких циркулює вода. Нагріта вода поступає в котел-утилізатор [4].

Для спостереження за станом шару й факелом горіння встановлене оглядове вікно, що обдувається повітрям. Для більш повного використання внутрішнього об'єму печі вихід газу здійснюється в центрі склепіння. Для проведення чищення і ремонту всередині печі встановлені лази, розташовані на рівні поду і розширеної верхньої циліндричної частини печі.

До введення в експлуатацію піч повинна бути ретельно просушена, щоб уникнути розтріскування й руйнування футеровки. Попередньо піч очищають від опалубки, лісів, будівельного сміття, перед сушкою повністю закривають грибки сталевими листами. В бункер тарілчастого живильника завантажують огарок або пісок на висоту не менше 300 мм. Сушку ведуть, використовуючи в якості палива сухі колоти дрова (або газ). Після досягнення температури 150°C подальший обігрів печі можна здійснювати продуктами горіння мазуту або газу. Загальна тривалість сушки в середньому 10-12 діб.

Продукти горіння й пари води видаляються, минаючи котел, через тимчасову витяжну трубу, змонтовану на люку газоходу від печі до котла. Під час сушки через охолоджуючі елементи повинна циркулювати вода. Одночасно з сушкою печі ведуть сушку та підготовку до пуску котла-утилізатора.

Виробництво сульфатної кислоти є безперервним. Це полегшує контроль і автоматизацію окремих його стадій.

У виробництві сульфатної кислоти все апарати з'єднані послідовно, тому порушення роботи

одного апарату або вузла впливає на режим всієї системи. При дотриманні технологічного режиму завод з виробництва сульфатної кислоти може працювати тривалий час без регулювання [2].

Автоматичні методи контролю та регулювання в виробництві сульфатної кислоти більш повно гарантують дотримання заданого режиму, а також дозволяють вивести обслуговуючий персонал зі шкідливих для здоров'я виробничих приміщень. При автоматичних методах контролю вимірювання проводяться безперервно.

Автоматичні прилади не тільки вказують, але і реєструють показання, а також подають сигнал при відхиленні від нормального режиму. Контроль виробництва забезпечує своєчасне виявлення відхилень технологічного режиму, з тим, щоб вчасно їх усунути і цим попередити порушення на інших ділянках. Крім того, контроль сприяє більш повному використанню встановленої апаратури, сировини та допоміжних матеріалів.

Для вимірювання температури газу, кислоти та води застосовують ртутні термометри, термометри опору і термопари. Температуру до 300-600°C заміряють термометрами опору і ртутними. Принцип дії термометра опору заснований на властивості металів змінювати провідність при зміні температури. Основною частиною термометра опору є тонка проволочка, що приєднана до приладу для вимірювання опору (логометр).

Температуру до 100°C вимірюють мідними термометрами опору. Більш високу температуру (до 300°C) вимірюють платиновими термометрами опору.

Для вимірювання температури від 300 до 1800°C застосовують термопари. Дія термопари заснована на появі електричного струму в місці спаювання двох проволочок з різних металів або сплавів. Вимірювання струму, що виникає, здійснюється гальванометром. Для захисту від руйнування термопара поміщається в захисну гільзу зі спеціальної сталі, порцеляни або кварцу [5].

Місцем будівництва виробництва сульфатної кислоти можна вибрати місто Суми – адміністративний центр Сумської області. Сумська область розташована на території Північно-Східного економічного району. До складу Північно-Східного економічного району також входять Полтавська і Харківська області. Район має вигідне економіко-географічне розташування відносно Донецько-Придніпровського економічного району.

На розміщення будь-якого хімічного підприємства найбільше впливають сировинний, паливно-енергетичний, водний, споживчий

і транспортний фактори, а також наявність трудових ресурсів. Оскільки місцем будівництва обране м. Суми, то розглянемо його з точки зору впливу цих факторів.

Оскільки в Україні відсутні поклади сірчаного колчедану, то проектоване виробництво сульфатної кислоти буде працювати на привізній сировині.

Постачальником електроенергії на проектоване виробництво буде Київська ГЕС.

Місто Суми знаходиться на березі річки Псел, тому вона буде джерелом технічної води. Для господарчо-побутових потреб вода буде відбиратися із міського водопроводу.

Розгалуженість транспортної системи Північно-Східного району забезпечить безперебійне постачання проектованого виробництва сировиною та збут готової продукції споживачам зі всієї України.

Проектоване виробництво буде повністю забезпечене висококваліфікованими трудовими кадрами – випускниками Сумського державного університету та Харківського національного технічного університету «ХП», а молодший виробничий персонал може набиратися з випускників машинобудівного коледжу СумДУ та Шосткінського фахового коледжу СумДУ.

Наявність сировинних, паливно-енергетичних, водних та трудових ресурсів, споживачів готової продукції і зручного транспортного сполучення дозволяє зробити висновок, що будівництво виробництва сульфатної кислоти в м. Суми є доцільним.

Аналіз техніко-економічних показників показує, що запропоновані заходи, не приведуть до зміни потужності виробництва та чисельності робітників, але скоротиться споживання енергетичних ресурсів, що зменшить собівартості одиниці продукції на 4,79%. При цьому прибуток на одиницю продукції збільшиться на 3,9%. Одноразові витрати на заходи складають 206,30 тис. грн. Вартість основних фондів збільшиться на 0,13%. Фондовіддача незначно знизиться, рентабельність витрат на виробництво зросте на 1,0% [6].

Річний економічний ефект від зниження собівартості продукції складе 19705,8 тис. грн, при цьому витрати окупляться за 0,01 року.

**Висновки.** У результаті проведеного дослідження технологічного процесу виробництва сульфатної кислоти контактним способом (система ПК-ПА) обґрунтовано доцільність модернізації стадії випалу сульфурвмісної сировини. Встановлено, що впровадження нового технічного рішення – проведення випалу сірчаного колче-

дану при швидкості газового потоку вище другої критичної швидкості псевдозрідження з рециркуляцією огарку – дозволяє досягти наступних результатів:

Інтенсифікація процесу: Створення особливих гідродинамічних умов над киплячим шаром значно прискорює масо- та теплообмін, що дає змогу знизити робочу температуру до 450–550°C без ризику шлакування матеріалу, одночасно підвищуючи зносостійкість пічних агрегатів.

Технологічна ефективність: Забезпечено високий ступінь вигорання сірки (не менше 98%) при

мінімальному надлишку кисню (не вище 1,04), що сприяє отриманню концентрованого випалювального газу (13%, SO<sub>2</sub>) та огарку у формі магнетиту (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>), придатної для прямого використання в металургії.

Енергозбереження та екологічність: Використання котла-утилізатора дозволяє ефективно утилізувати тепло реакції для отримання енергетичної пари (4 МПа), а багатоступенева система очищення та подвійне контактування (99,8%) мінімізують викиди оксидів сульфуру, забезпечуючи високу екологічну безпеку виробництва.

#### Список літератури:

1. Концевой А.Л., Концевой С.А. Технологія неорганічних кислот і солей : навч. посіб. К. : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. 150 с.
2. Денисюк Р. О. Хімічна технологія : підручник. Житомир : Вид-во ЖДУ ім. І. Франка, 2017. 350 с.
3. Іванченко Л.В., Кожухар В.Я., Усатюк І.І. Технологія сульфатної кислоти : навч. посіб. Одеса : ОП, 2021. 196 с.
4. Яворський В. Технологія сірки і сульфатної кислоти : підручник / В. Яворський. Львів : Вид-во Львівської політехніки, 2010. 404 с.
5. Концевой А.Л., Концевой С.А. Технологія і алгоритми розрахунків виробництва сульфатної кислоти : навч. посіб. К. : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 170 с.
6. Степанюк А.Р. Пічне обладнання у хімічних процесах : навч. посіб. К. : НТУУ «КПІ», 2016. 132 с.

#### Zolotarova O.V. RESEARCH OF SULFURIC ACID PRODUCTION WITH THE DEVELOPMENT OF THE SULFUR-CONTAINING RAW MATERIALS ROASTING STAGE

*The relevance of the scientific work is driven by the need to modernize chemical-technological systems for sulfuric acid production amidst growing demand for mineral fertilizers and the necessity to increase the energy efficiency of industrial units. Traditional pyrite roasting schemes require optimization due to significant energy consumption and high environmental impact. The search for technical solutions to intensify the process in fluidized bed furnaces, ensure comprehensive waste recycling, and reduce production costs is a strategically important task for Ukraine's chemical industry in the context of resource conservation and environmental safety.*

*In this work, based on the adopted technical solution, changes were made to the technological scheme of sulfuric acid production. Material and heat balance calculations for the pyrite roasting stage were performed, along with the structural design of a fluidized bed furnace and the selection of technological equipment for the developed stage.*

*The proposed automation system for the pyrite roasting stage allows the technological process to be conducted in an optimal mode, ensuring a stable concentration of sulfur dioxide in the roasting gas and the production of a high-quality final product.*

*Sulfuric acid production is accompanied by the generation of significant amounts of solid waste in the form of pyrite cinders and selenium sludges. The project provides a detailed review of modern disposal methods for these wastes, enabling the implementation of low-waste production principles. Thanks to the introduction of advanced purification systems, waste gas emissions (\$SO\_2\$ and \$SO\_3\$) are minimized to within permissible sanitary limits. The organization of labor protection and industrial safety at the projected facility ensures the safety, health, and productivity of the personnel.*

*The new technical solution proposed in this qualification work will allow for a 4.79% reduction in the cost of finished products, while the profit per unit of product will increase by 3.9%. The annual economic effect from the cost reduction will amount to 19,705.80 thousand UAH, and the capital costs for modernization will pay back in 0.01 years, confirming the high investment significance of the project.*

**Keywords:** sulfuric acid, pyrite, roasting, fluidized bed furnace, catalyst.

Дата першого надходження статті до видання: 16.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 11.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 08.04.2026