

УДК 66.041.2:66.095.2

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2026.3.2/29>**Румянцева М.О.**<https://orcid.org/0009-0006-5674-6428>

Український державний університет науки і технологій

Мисов О.П.<https://orcid.org/0009-0005-3770-2166>

Український державний університет науки і технологій

Савченко М.А.<https://orcid.org/0009-0003-6520-7539>

Український державний університет науки і технологій

КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ОСАДЖЕННЯ КРЕМНЕЗЕМУ СІРЧАНОКИСЛОТНИМ СПОСОБОМ (ЧАСТИНА II)

3

Досліджено три варіанти організації процесу осадження аморфного діоксиду кремнію сірчанокислотним способом, який широко застосовується в промисловості для отримання високодисперсного кремнезему з регульованими фізико-хімічними властивостями. Розглянуто ступінчасту подачу кислоти, безперервну дозовану подачу та синхронне введення сірчаної кислоти й розчину силікату натрію в реакційний апарат. Зазначені способи відрізняються характером зміни рН середовища, швидкістю перебігу реакції нейтралізації, інтенсивністю тепловиділення та умовами масо- і теплообміну, що безпосередньо впливає на формування структури осаду, дисперсність частинок і стабільність технологічного режиму.

Моделювання процесу виконано в програмному середовищі ChemCAD із урахуванням матеріального і теплового балансів, кінетичних закономірностей реакції та параметрів теплообміну в апараті. Отримано залежності зміни концентрації основних компонентів у часі, побудовано температурні профілі реакційної суміші та проаналізовано режими теплообміну для кожного варіанта організації процесу. Досліджено вплив способу подачі реагентів на стабільність температурного режиму, рівномірність перебігу процесу осадження та ефективність відведення тепла з реакційної зони.

Проведено порівняння стабільності процесу за величиною максимальних температурних відхилень, тривалістю перехідних процесів, часом встановлення стаціонарного режиму та інтегральною помилкою регулювання температури. Встановлено, що ступінчаста подача супроводжується локальними температурними піками та нерівномірним перебігом реакції, тоді як безперервна дозована подача забезпечує більш плавний і контрольований перебіг процесу. Найбільш ефективною виявилася синхронна подача реагентів, яка мінімізує температурні градієнти, підвищує стабільність технологічного режиму та забезпечує однорідність утвореного осаду, що робить її перспективною для практичного застосування у виробництві високодисперсного діоксиду кремнію.

Ключові слова: кремнезем, осадження, сірчанокислотний метод, імітаційне моделювання, ChemCAD, температурна стабільність.

Постановка проблеми. Сучасні технології отримання високодисперсного кремнезему сірчанокислотним способом характеризуються складною взаємодією хімічної кінетики, тепломасообміну та гідродинаміки. Особливістю процесу є інтенсивне тепловиділення під час нейтралізації силікату натрію, що призводить до локальних температурних градієнтів і нестабільності рН середовища. Це, у свою чергу, визначає морфологію частинок, питому поверхню та структурні

характеристики кінцевого продукту. У промислових умовах контроль зазначених параметрів ускладнюється через:

швидкоплинність реакцій, неоднорідність середовища, складність масштабування лабораторних результатів.

Традиційні експериментальні підходи потребують значних матеріальних і часових витрат, що обмежує можливість системного дослідження впливу режимів подачі реагентів. У зв'язку з цим



актуальним є застосування методів комп'ютерного моделювання, які дозволяють досліджувати процес у широкому діапазоні параметрів та прогнозувати поведінку системи без проведення великої кількості експериментів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У сучасній хімічній технології комп'ютерне моделювання стало ключовим інструментом для дослідження та оптимізації процесів. Значна кількість робіт присвячена використанню спеціалізованих програмних пакетів, серед яких важливе місце займає ChemCAD.

У роботі Pérez-Sánchez та ін. [1] показано, що ChemCAD широко застосовується для моделювання складних хіміко-технологічних процесів, зокрема виробництва стиролу, з можливістю визначення матеріальних потоків і основних параметрів обладнання. Аналогічний підхід використано в дослідженні виробництва акрилової кислоти, де за допомогою ChemCAD проведено розрахунок матеріальних балансів та аналіз впливу температури і тиску на ефективність процесу.

У роботі Pérez-Sánchez та ін. [2,3] здійснено моделювання процесу отримання оксиду етилену, що підтверджує можливість застосування ChemCAD для опису реакційно-каталітичних систем і розрахунку теплових ефектів. Подібні підходи також використовуються для моделювання складних багатостадійних процесів, таких як перетворення CO₂ у рідкі палива з урахуванням кінетики реакцій і рециркуляції потоків [4].

Окремий напрям досліджень пов'язаний із використанням ChemCAD для аналізу процесів з інтенсивним тепломасообміном. Зокрема, при моделюванні реакційної дистиляції [5] показано, що результати розрахунків добре узгоджуються з експериментальними даними, що підтверджує адекватність застосування програмного комплексу для інженерних задач. Крім того, дослідження термодинамічних властивостей речовин у ChemCAD [6] демонструють достатньо високу точність розрахунків ентальпії, ентропії та фазової рівноваги, що є критично важливим для моделювання теплових режимів процесів.

Таким чином, аналіз літератури свідчить, що ChemCAD ефективно застосовується для:

- моделювання реакторів різного типу;
- розрахунку матеріальних і теплових балансів;
- дослідження впливу технологічних параметрів;
- оптимізації режимів роботи хімічних виробництв [7].

Разом з тим, незважаючи на значну кількість робіт, питання моделювання процесу осадження аморфного діоксиду кремнію сірчанокислотним

способом залишаються недостатньо дослідженими. Зокрема:

- відсутній системний аналіз впливу способу подачі реагентів на теплові режими;
- недостатньо вивчено динаміку зміни рН у поєднанні з тепловими ефектами;
- практично відсутні роботи, де здійснено порівняльне моделювання різних режимів подачі (ступінчастого, безперервного, синхронного) в єдиній постановці задачі.

Це визначає актуальність проведення дослідження, спрямованого на комплексне моделювання зазначеного процесу з використанням сучасних програмних засобів.

Постановка завдання. Метою даної роботи є комп'ютерне моделювання процесу осадження аморфного діоксиду кремнію сірчанокислотним способом із використанням програмного комплексу ChemCAD та порівняльний аналіз ефективності різних способів подачі реагентів.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- розробити модель процесу осадження з урахуванням матеріального та теплового балансів;
- змоделювати три режими подачі реагентів: ступінчастий, безперервний та синхронний;
- визначити температурні профілі та динаміку зміни концентрацій компонентів;
- оцінити стабільність процесу за критеріями температурних відхилень і часу встановлення режиму;
- встановити найбільш ефективний режим, що забезпечує мінімальні температурні градієнти та однорідність осаду.

У раніше проведених дослідженнях [8] було розроблено модель процесу осадження кремнезему сірчанокислотним способом. Ця робота присвячена аналізу трьох способів подачі реагентів. Для дослідження було реалізовано три моделі:

Ступенева подача кислоти в реактор із розчином силікату натрію [9], рис. 1.

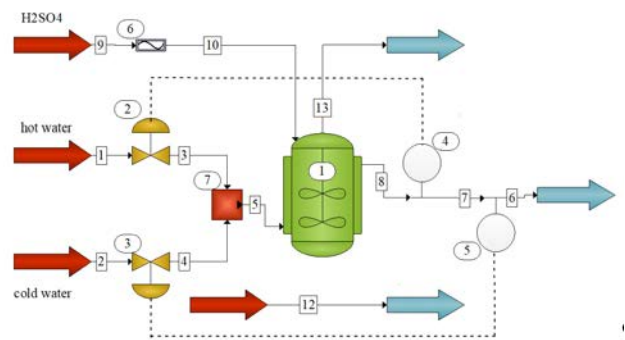


Рис. 1. Технологічна схема синтезу кремнезему із силікату натрію двоступеневим способом подачі кислоти

Передбачалося, що в початковий момент часу в реакторі 1 міститься розчин об'ємом 1 м³, який складається з 257,8 кг силікату натрію і 822,2 кг води. Щільність розчину 1080 кг/м³.

Імітацію подачі кислоти здійснювали програмно з використанням контролера RAMP (блок 6), її розділили на два умовні етапи.

- Перший етап тривав 10 хв за швидкості подачі кислоти 1,67 кг/хв, після чого відбувалася пауза 60 хв.

- Другий етап тривав 4 хв із витратою кислоти 5,34 кг/хв, потім передбачалося витримка. Загальна тривалість до завершення подачі кислоти становила 74 хв.

Безперервна дозована подача кислоти в реактор із розчином силікату натрію.

Технологічна схема синтезу кремнезему із силікату натрію за безперервного методу дозування кислоти аналогічна до схеми, наведеної на рис. 1. Відмінність полягає лише в програмі управління клапаном 8. У даному випадку моделювалася подача кислоти в одноступінчастому режимі зі швидкістю 0,52 кг/хв протягом 74 хв.

Одночасна (синхронна) дозована подача кислоти і розчину силікату натрію в реактор, рис. 2.

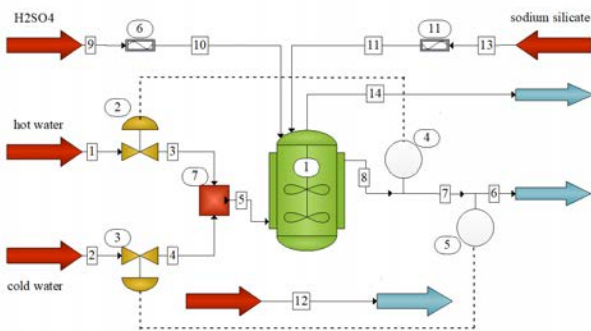


Рис. 2. Технологічна схема синтезу кремнезему із силікату натрію за одночасного дозованого способу подачі кислоти і розчину силікату натрію в реактор

У вихідному стані в реакторі (блок 1) містилося 822,2 кг води. Модель передбачала одночасну (синхронну) подачу сірчаної кислоти і силікату натрію. Витрата кислоти становила 0,52 кг/хв (блок 6), витрата силікату натрію – 3,48 кг/м³ (блок 11).

Виклад основного матеріалу

Ступенева подача кислоти в реактор

На рис. 3 представлено результати розрахунку зміни кількості компонентів за двоступеневого способу подачі реагентів. Характерною особливістю цього режиму є стрибкоподібне утворення мономерних сполук кремнієвої кислоти та сповільнений процес їх подальшої конденсації від-

повідно до реакції (2) синтезу кремнезему. На початковій стадії відбувається інтенсивне утворення побічних продуктів (сульфатів), після чого спостерігається поступове накопичення діоксиду кремнію.

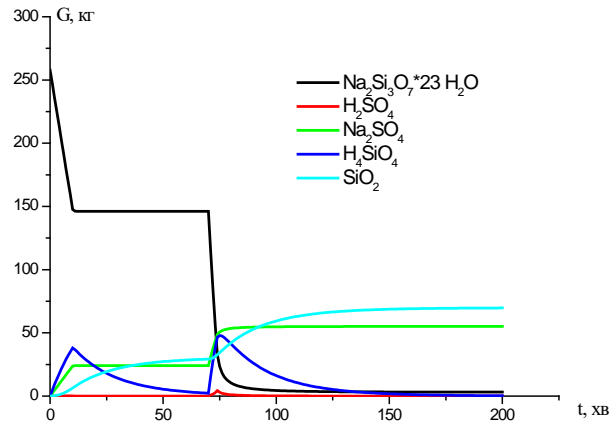


Рис. 3. Залежність кількості компонентів у реакторі від часу. Спосіб осадження кремнезему двоступеневий

Як видно з рис. 4, утворення кремнезему збігається з найбільш різкою зміною температури реактора. Температурні коливання в межах 80-90 °C мають значний вплив на кінетику процесу і призводять до формування осаду з погіршеними фізико-хімічними властивостями (наприклад, зниженою питомою поверхнею і збільшеною щільністю агрегатів).

Таким чином, двоступеневий режим подачі реагентів характеризується нерівномірним перебігом реакцій, високою чутливістю до зміни температури і менш сприятливими умовами для отримання кремнезему необхідної якості.

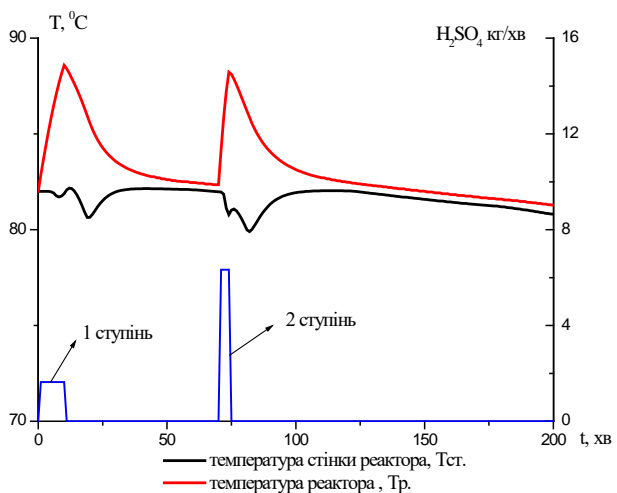


Рис. 4. Температура реактора і температура стінки реактора при двоступеневій подачі кислоти

На рис. 5 показано зміни витрати охолоджувальної та нагрівальної води під час регулювання температури реактора. Для двоступеневого способу подачі кислоти характерні різкі теплові збурення, що позначається на роботі клапанів системи охолодження і підігріву.

На початку кожного ступеня спостерігається стрибкоподібне зростання тепловиділення, пов'язане з інтенсивним утворенням мономерів і подальшою реакцією конденсації. У відповідь на це клапан подачі холодної води (синя лінія) відкривається практично повністю, забезпечуючи високу витрату (до 12-13 кг/хв). У міру зниження теплового ефекту подача холодної води поступово зменшується, і система повертається до підтримки базового рівня.

На другому етапі процес повторюється: під час надходження кислоти знову зростає теплове навантаження, і клапан охолодження відкривається до максимального значення. Надалі, у міру стабілізації реактора, витрата охолоджувальної води зменшується.

Паралельно з цим вмикається подача гарячої води (червона лінія), яка компенсує переохолодження системи і підтримує температуру в допустимому діапазоні. Витрата гарячої води зростає до кінця процесу, коли тепловиділення реакції знижується, і потрібен додатковий підігрів для утримання температури на заданому рівні.

Таким чином, робота клапанів у режимі П-регулятора за двоступеневої подачі кислоти має **імпульсний характер**:

- клапан охолодження реагує на швидкі сплески температури, відкриваючись майже миттєво і на значну величину;

- клапан води, що нагріває, вмикається з деяким запізненням і забезпечує поступову стабілізацію температурного режиму на завершальних стадіях.

Такий режим регулювання дає змогу утримувати температуру реактора в межах 80-90°C, проте супроводжується значними коливаннями витрат теплоносіїв, що вказує на високу нестійкість процесу і чутливість системи до збурень.

Безперервне дозоване подавання кислоти

Графік, представлений на рис. 6, ілюструє зміну кількості компонентів у реакторі в ході реакції за безперервної подачі сірчаної кислоти. Процес протікає більш плавно, без різких стрибків, що характерно для одноступеневої подачі. Тут спостерігається поступове утворення кремнезему, що свідчить про більш стабільну кінетику реакції. На відміну від двоступеневої подачі, процес у даному випадку йде рівномірно, що виключає сильні теплові піки і сприяє більш контрольованому процесу.

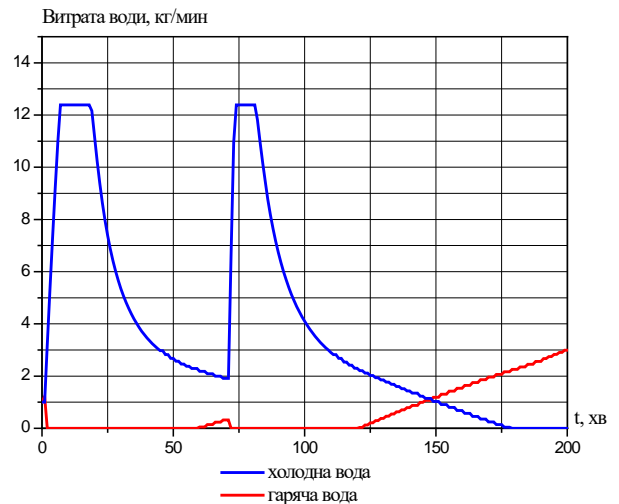


Рис. 5. Витрата води в сорочці охолодження і підігріву реактора при двоступеневій подачі кислоти

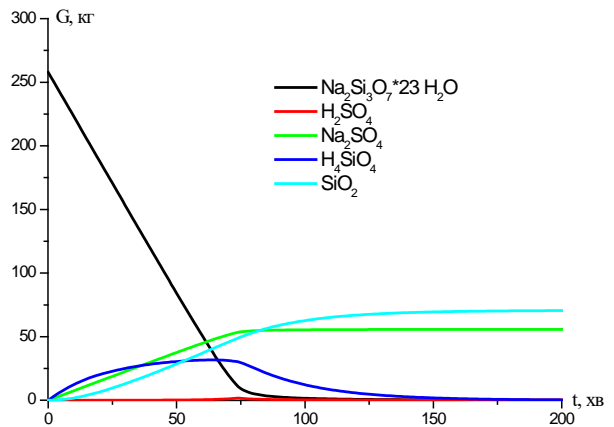


Рис. 6. Залежність кількості компонентів у реакторі від часу. Спосіб осадження кремнезему одноступеневий

Графік на рис. 7 показує стабільність температурного режиму за безперервної подачі кислоти. Температура в реакторі коливається, але залишається в межах оптимального діапазону. Ці коливання не такі виражені, як за двоступеневої подачі кислоти, завдяки більш рівномірному процесу подачі. Такий спосіб дає змогу підтримувати процес у заданому тепловому режимі, що значно знижує ризик перегріву і сприяє отриманню кремнезему з більш стабільними характеристиками.

На рис. 8 зображено зміну витрати води, використаної для охолодження і підігріву реактора. На відміну від двоступеневого способу, тут витрата води змінюється плавно і не має різких стрибків, що свідчить про більш стійкий температурний режим у процесі. Це вказує на більш контрольовану та передбачувану поведінку системи теплообміну, що забезпечує надійну термостабільність процесу.

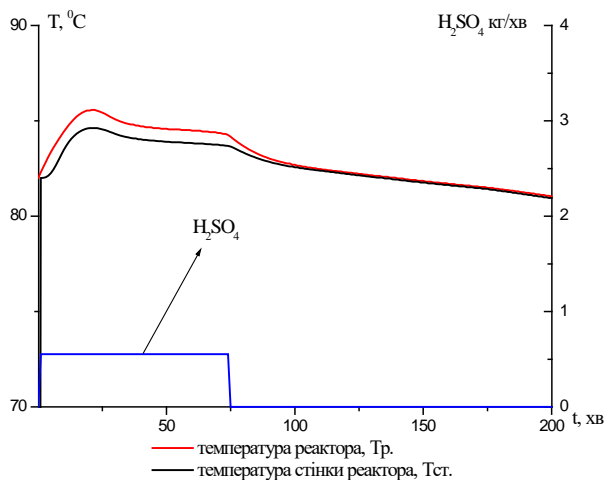


Рис. 7. Температура реактора і температура стінки реактора за одноступеневої подачі кислоти

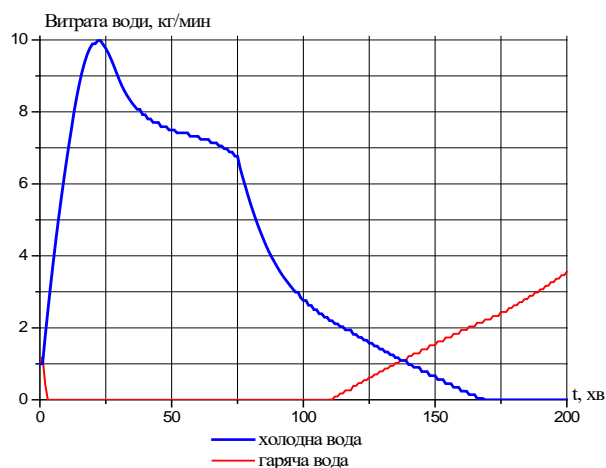


Рис. 8. Витрата води в сорочці охолодження і підігріву реактора за одноступеневої подачі кислоти

Синхронне подавання

На рис. 9 представлено динаміку зміни концентрацій компонентів у разі синхронної подачі сірчаної кислоти та силікату натрію. Одночасне дозування реагентів сприяє рівномірному протіканню процесу осадження та запобігає різким стрибкам в утворенні кремнезему. Порівняно з іншими методами, синхронна подача забезпечує більш стабільний вміст компонентів у реакційній суміші та виключає швидкі коливання в перебігу реакції, що дає змогу отримувати продукт із покращеними та відтворюваними характеристиками.

На рис. 10 показано динаміку температурного режиму реактора за синхронної подачі реагентів. Подача кислоти і силікату натрію в стехіометрично узгодженій пропорції знижує амплітуду

температурних коливань і запобігає локальним перегревам. На відміну від двоступеневого і безперервного методів дозування кислоти, цей спосіб забезпечує більш рівномірний тепловий баланс у реакторі, що сприяє формуванню кремнезему з оптимальними фізико-хімічними властивостями.

На рис. 11 наведено дані про зміну витрати охолоджувальної та нагріваючої води за синхронної подачі реагентів. Перевагою такого режиму є зниження перепадів у споживанні теплоносіїв, що вказує на більш стабільну роботу системи теплообміну. Одночасна подача кислоти і силікату натрію мінімізує температурні піки, знижує навантаження на систему охолодження і підігріву і робить процес більш енергоефективним і передбачуваним. Для порівняння, за двоступеневого методу аналогічні коливання виражені значно сильніше.

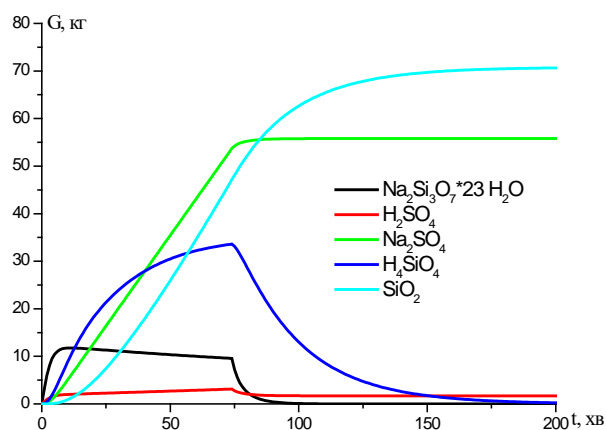


Рис. 9. Залежність кількості компонентів у реакторі від часу. Спосіб осадження кремнезему при одночасному дозуванні кислоти та силікату натрію

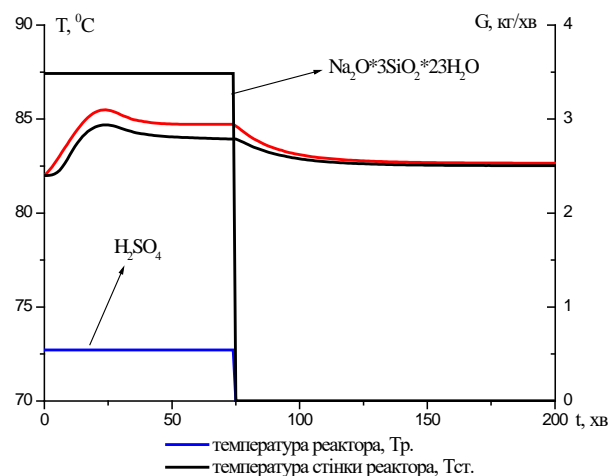


Рис. 10. Температура реактора і температура стінки реактора при одночасному дозуванні кислоти і силікату натрію

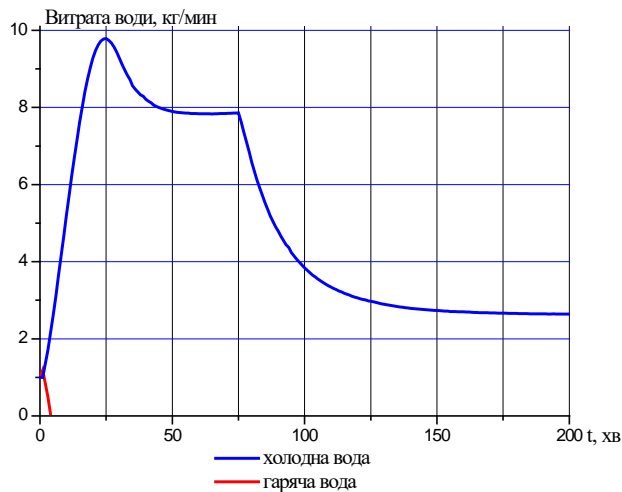


Рис. 11. Витрата води в сорочці охолодження і підігріву реактора при одночасному дозуванні кислоти і силікату натрію

Для порівняння різних способів подачі інгредієнтів було розраховано максимальне перерегулювання M_p [10],

$$M_p = \frac{T_{max} - T_{\infty}}{T_{\infty}} \cdot 100\%$$

де: T_{max} – максимальне значення температури в реакторі,
 T_{∞} – стала температура (≈ 82 °C на всіх графіках) і, безрозмірна, нормована інтегральна помилка за модулем ε [11],

$$\varepsilon = \frac{1}{T_{\infty} T_0} \int_0^{T_0} (T(t) - T_{\infty}) dt$$

де $T_0 = 200$ хв, вказаний час процесу.
 Результати зведені в таблицю 1.

Таблиця 1

Результати порівняння способів подачі інгредієнтів

Варіант подачі інгредієнтів	M_p , %	ε	Час вирівнювання температури, хв
Двоступенева	8.0	0.027	180
Безперервна дозована	4.3	0.013	130
Синхронна	4.2	0.009	110

Як видно з таблиці, синхронний спосіб найстабільніший, і хоча максимальна температура відхилення від заданої близька до температури за безперервного способу, інтегральна нерівномірність і час стабілізації істотно менші. Двоступеневий спосіб дає найбільше відхилення температури і часу стабілізації.

Висновки. Двоступеневий спосіб (рис. 3-4) характеризується стрибкоподібною зміною концентрацій проміжних і кінцевих продуктів. На першій стадії утворюється значна кількість мономерів

і побічних сполук, а на другій – відбувається різке накопичення діоксиду кремнію. Цей процес супроводжується коливаннями температури в діапазоні 80-90 °C, що негативно позначається на фізико-хімічних властивостях кінцевого продукту.

За одноступеневого способу подачі кислоти (див. рис. 2) процес протікає більш рівномірно. Реагент подається з постійною швидкістю, що сприяє поступовому утворенню мономерів кремнієвої кислоти та їх подальшій поліконденсації в діоксид кремнію. У цьому разі температурний режим реактора відносно стабільний, що дає змогу формувати осад з більш однорідними структурними характеристиками.

Синхронна подача кислоти і силікату натрію являє собою найстабільніший метод з мінімальними температурними коливаннями і рівномірним розподілом реагентів. Це дає змогу досягти високих показників якості кремнезему і стабільності процесу. Одночасна подача сірчаної кислоти і силікату натрію безпосередньо в реактор у заданій стехіометричній пропорції – перспективний спосіб, особливо з точки зору термічної стабільності. Такий підхід може забезпечити:

Температурна стабільність. За рахунок рівномірного й одночасного надходження реагентів екзотермічна реакція протікає не стрибкоподібно, а поступово, що знижує локальні перегріву.

Керованість процесу. Можливість реалізації автоматизованого управління співвідношенням потоків, що дає змогу стабільно підтримувати рН і температуру в межах оптимуму (наприклад, ~ 82 °C).

Висока однорідність осадження. За правильно підібраних швидкостей подачі забезпечується постійна зона осадження і рівномірний розподіл частинок, що покращує дисперсні характеристики кремнезему.

Мінімізація перевантажень теплообмінної системи. Відсутність різких температурних стрибків знижує навантаження на сорочки і теплообмінники, спрощуючи їхній розрахунок і експлуатацію. Однак, такий метод не позбавлений деяких недоліків:

Необхідність більш високого ступеня автоматизації.

Складнощі в регулюванні початку осадження. Реакція починається негайно під час зіткнення реагентів. Тому зона контакту має бути ретельно продумана, інакше може виникнути локальне перенасичення, що призведе до коагуляції та утворення великих часток або навіть гелю.

Підвищені вимоги до дозувальних систем. Для забезпечення синхронності та стабільності подачі обох реагентів необхідні високоточні насоси або витратоміри. Порушення співвідношення потоків моментально змінює рН і умови осадження.

Складнощі масштабування. При переході з лабораторного на пілотний і промисловий рівні важливо точно відтворювати гідродинаміку змі-

шування. В іншому разі може виникнути неоднорідність продукту за партіями.

Обмеження за типом продукту. Цей метод найкраще підходить для отримання дрібнодисперс-

ного аморфного кремнезему. Для пористих форм або структурованих матеріалів, де потрібне поетапне осадження, може знадобитися складніша подача.

Список літератури:

1. Pérez-Sánchez A., Pérez-Sánchez E. J., Segura Silva R. M. Simulation of the styrene production process via catalytic dehydrogenation of ethylbenzene using CHEMCAD®. *Tecnura*. 2017. Vol. 21, No. 53. P. 15–31. URL: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=257054721002>.
2. Pérez-Sánchez A., Pérez-Sánchez E. J., Segura Silva R. M. Simulation of the acrylic acid production process through catalytic oxidation of gaseous propylene using ChemCAD® simulator. *Ingeniare*. 2019. Vol. 27, No. 1. P. 142–150. DOI: <https://doi.org/10.4067/S0718-33052019000100142>.
3. Pérez-Sánchez A., Baltá García J. G., Montalván Viart J. R., Ranero González E., Pérez-Sánchez E. J. Simulation of the ethylene oxide production process in ChemCAD® simulator. *Revista Ciencia y Tecnología*. 2022. Vol. 24, No. 3. P. 15–24. DOI: <https://doi.org/10.36995/j.recyt.2022.37.002>.
4. Meiri N., Radus R., Herskowitz M. Simulation of novel process of CO₂ conversion to liquid fuels. *Journal of CO₂ Utilization*. 2017. Vol. 17. P. 284–289. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.347-353.3706>.
5. Wang X. G., Yang Y. Y. Simulation of reactive distillation process with ChemCAD. *Advanced Materials Research*. 2011. Vol. 347–353. P. 3706–3709. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.347-353.3706>.
6. Comparison of pure component thermodynamic properties from CHEMCAD with direct calculation using the Peng–Robinson equation of state. *Chemical Data Collections*. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cdc.2020.100571>.
7. Bridging industry, research, and classroom using ChemCAD simulation. *Education for Chemical Engineers*. 2026. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ece.2026.100506>.
8. Румянцева М.О., Мисов О.П. Комп'ютерне моделювання процесу осадження кремнезему сірчано-кислотним способом (частина 1). *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського*. 2025. Том 36, № 6. С. 125–136. DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.6.1/29>.
9. Process for the preparation of precipitated silicas having morphology similar to pyrogenic silicas: пат. US 4127641 A, МПК C01B 33/12 / R. K. Iler, J. R. McKay ; E. I. du Pont de Nemours and Company. Заявл. 03.06.1977 ; опубл. 28.11.1978. URL: <https://patents.google.com/patent/US4127641A/en>.
10. Ogata K. *Modern Control Engineering*. 5th ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2010. 894 p. URL: https://mechfamily-ju.com/storage/images/files/file_17314308026pQTy.pdf.
11. Åström K.J., Hägglund T. *PID Controllers: Theory, Design, and Tuning*. 2nd ed. Research Triangle Park: Instrument Society of America, 1995. 343 p. URL: <https://reviewbooku.com/review/pid-controllers-theory-design-and-tuning-4974125>.

Rumiantseva M.O., Mysov O.P., Savchenko M.A. COMPUTER MODELING OF THE SILICA PRECIPITATION PROCESS BY THE SULFURIC ACID METHOD (PART II)

Three variants of organizing the precipitation process of amorphous silicon dioxide using the sulfuric acid method, which is widely applied in industry for the production of highly dispersed silica with controlled physicochemical properties, were investigated. Stepwise acid addition, continuous metered feeding, and synchronous introduction of sulfuric acid and sodium silicate solution into the reactor were considered. These methods differ in the pattern of pH variation in the reaction medium, the rate of the neutralization reaction, the intensity of heat release, and the conditions of mass and heat transfer, which directly affect the formation of the precipitate structure, particle dispersion, and the stability of the technological regime.

Process simulation was performed in the ChemCAD software environment taking into account material and heat balances, kinetic characteristics of the reaction, and heat transfer parameters in the reactor. Dependencies of the concentration changes of the main components over time were obtained, temperature profiles of the reaction mixture were constructed, and heat transfer modes were analyzed for each process configuration. The influence of the reagent feeding method on the stability of the temperature regime, the uniformity of the precipitation process, and the efficiency of heat removal from the reaction zone was investigated.

A comparison of process stability was carried out based on the magnitude of maximum temperature deviations, the duration of transient processes, the time required to reach steady-state conditions, and the integral temperature control error. It was established that stepwise feeding is accompanied by local temperature peaks and a non-uniform course of the reaction, whereas continuous metered feeding ensures a smoother and more controlled process. The most effective approach was found to be the synchronous feeding of reagents, which minimizes temperature gradients, increases the stability of the technological regime, and ensures the uniformity of the formed precipitate, making it a promising method for practical application in the production of highly dispersed silicon dioxide.

Keywords: silica, precipitation, sulfuric acid method, simulation modeling, ChemCAD, thermal stability.

Дата першого надходження статті до видання: 09.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 06.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 19.05.2026