

І.Л. ЛЕВЧУК

Український державний хіміко-технологічний університет
ORCID Author ID: 0000-0002-8983-0558
e-mail: lil8192@gmail.com

О.П. МИСОВ

Український державний хіміко-технологічний університет
ORCID Author ID: 0000-0003-2114-1382
e-mail: musov@ua.fm

К.О. ФЕСЕНКО

Український державний хіміко-технологічний університет
ORCID Author ID: 0000-0001-5590-2675
e-mail: Ksenia_ksenia@i.ua

М.О. САВЧЕНКО

Український державний хіміко-технологічний університет

РОЗРОБКА КОМП'ЮТЕРНОЇ МОДЕЛІ ПРОЦЕСУ ОТРИМАННЯ РОЗЧИНУ МІДНОГО КУПОРОСУ, АДАПТОВАНОЇ ДЛЯ РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧ УПРАВЛІННЯ

В роботі наведено результати розробки та дослідження комп'ютерної моделі процесу виробництва розчину мідного купоросу за допомогою універсальної моделюючої програми ChemCAD, а також розроблені принципи інтеграції цієї моделі до сучасних SCADA систем.

Ключові слова: мідний купорос, комп'ютерна модель, універсальна моделююча програма, система керування, OPC сервер.

LEVCHUK IGOR L.

Ukrainian State Chemical and Technological University

MYSOV OLEG P.

Ukrainian State Chemical and Technological University

FESENKO KSENIA O.

Ukrainian State Chemical and Technological University

SAVCHENKO MARIA O.

Ukrainian State Chemical and Technological University

DEVELOPMENT OF A COMPUTER MODEL FOR OBTAINING A SOLUTION OF COPPER SULFATE ADAPTED FOR SOLVING CONTROL PROBLEMS

Copper sulfate is an inorganic compound that is currently widely used in the chemical industry, medicine and agriculture. When developing systems for automated control of the process of obtaining copper sulfate, there is a need for simple, high-speed and at the same time accurate mathematical models that are used both in improving algorithms for optimal control of this process, and in developing operator interfaces and debugging control algorithms. At the same time, the development of full-fledged mathematical models of technological processes is a very laborious task that requires significant material and time costs.

The subject of study in the article is a computer model of the process of obtaining a solution of copper sulfate, implemented in the software environment of the universal modeling program ChemCAD.

The aim of the work is to develop in a software environment a universal modeling program ChemCAD, a computer model of the process of obtaining a solution of copper sulphate, adapted for solving problems of control and integration into modern SCADA systems.

Objectives: to develop a computer model of the process of obtaining a solution of copper sulfate in the ChemCAD simulation program; explore the process using a computer model, get graphical dependencies that describe the main technological parameters of the process; perform a comparative analysis of the data obtained by calculation with the experimental data of the laboratory setup and draw a conclusion about the functionality of the developed computer model; adapt the computer model to solve the control problem and develop the principles of two-way information exchange of the computer model based on OPC technology with the modern SCADA system TRACE-MODE 6.

The methods used are: computer modeling of technological processes; OPC technology; SCADA.

Conclusions: the novelty of the results obtained is as follows. In the ChemCAD software environment, a computer model of the process of obtaining a solution of copper sulfate has been developed, adapted for solving control problems and integration into existing SCADA systems. The principles and structure of two-way information exchange of a computer model with external control programs based on OPC technology have been developed.

Keywords: copper sulfate, computer model, universal simulator, control system, OPC server.

Постановка проблеми

При вирішенні завдань автоматизованого управління різними технологічними процесами існує величезна потреба в досить точних і в той же час простих і швидкодіючих математичних моделях процесів, що підлягають управлінню. Такі моделі використовуються в системах промислової автоматизації, в першу чергу при вирішенні завдань оптимального управління технологічними процесами, тому що математична модель дозволяє системі управління прогнозувати поведінку реального процесу без постановки експерименту на реальному об'єкті управління. В той же час розробка точних і швидкодіючих математичних моделей технологічних процесів – дуже трудомістке завдання, що вимагає істотних часових і матеріальних витрат, а також залучення висококваліфікованих фахівців [1].

На сьогоднішній день в області програмного забезпечення з'явився особливий клас програмних пакетів, призначених для комп'ютерного моделювання різних технологічних процесів, найбільш популярними серед яких є ChemCAD, PRO//II, Hysys, DWSIM, Aspen Plus. Розробка моделей в цих пакетах здійснюється у візуальній формі, на основі технологій об'єктно-орієнтованого програмування, що значно спрощує і полегшує процес створення математичних моделей. А наявність вбудованої технології OPC (Open Platform Communication) дозволяє отриманим математичним моделям здійснювати інформаційний обмін з будь-якими сторонніми пристроями і програмами, у тому числі і призначеними для вирішення завдань автоматизованого управління технологічними процесами [2].

Сульфат міді (мідний купорос) є найважливішою сілью міді, яка знаходить широке застосування в медицині, хімічній промисловості і сільському господарстві. Продуктивність процесу отримання мідного купоросу значною мірою залежить від ефективності використовуваної системи управління, для підвищення якої потрібна математична модель процесу. З урахуванням різноманітності застосування мідного купоросу можна зробити висновок, що удосконалення процесу його отримання є актуальним питанням [3].

Метою даної роботи є розробка адаптованої для вирішення завдань управління, комп'ютерної моделі процесу отримання розчину мідного купоросу в універсальній моделюючій програмі ChemCAD.

Аналіз останніх джерел

Мідний купорос – неорганічне з'єднання з хімічною формулою $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, є прозорими кристалами різних відтінків синього, легко розчиняється у воді, має гіркувато-металевий терпкий смак [3].

Спектр застосування мідного купоросу дуже широкий. Наприклад, в будівництві водний розчин сульфату міді застосовується для нейтралізації наслідків протікання, ліквідації плям іржі, а також для видалення виділень солей з цегляних, бетонних і оштукатурених поверхонь, а також як антисептичний і фунгіцидний засіб для запобігання гниття деревини [4]. У сільському господарстві мідний купорос застосовується як антисептик, фунгіцид і мідно-сірчане добриво [5]. Для боротьби з цвітінням води у водосховищах також використовується хімічна обробка мідним купоросом. Також застосовується для виготовлення мінеральних фарб [6], у медицині – як один з компонентів електролітичних ванн для міднення [7]. У харчовій промисловості зареєстрований в якості харчової добавки E519, використовується як фіксатор забарвлення і консервант [8].

Способи виробництва мідного купоросу розрізняють головним чином за видами сировини, яку застосовують:

- з мідного брухту і відходів міді (стружки, висікання, дроту, тирси і т. п.) з окисненням міді киснем повітря, електролізом або розчином хлорного міді [9];
- з окису міді і сірчистого газу [10];
- з окислених мідних руд, що містять незначну кількість міді [11].

Але найголовніший – баштовий (з мідного брухту), головною сировиною якого є мідь і сірчана кислота. Комп'ютерна модель цього способу отримання мідного купоросу реалізована в цій роботі.

Виклад основного матеріалу

За допомогою універсальної моделюючої програми ChemCAD була реалізована комп'ютерна модель першої стадії процесу отримання розчину мідного купоросу з мідного лому. Структура комп'ютерної моделі представлена на рисунку 1.

На вхід процесу надходять:

- окисник міді, сірчана кислота;
- кисень, який потрібен для окислення міді;
- мідний брухт.

Кінцевим продуктом процесу є:

- розчин сульфата міді що надходить на подальшу кристалізацію;
- парова фаза, яка відводиться з сепаратору «4»;
- вода, що утворюється при розчиненні оксиду міді в сірчаній кислоті.

Процес отримання розчину мідного купоросу в комп'ютерній моделі складається з трьох стадій:

1. Підведення реагуючих речовин до твердої поверхні;
2. Хімічної реакції;
3. Відведення розчинних продуктів реакції в розчин.

Основними апаратами процесу є:

1. Реактор «1» з безперервним змішуванням, в якому відбувається окислення одновалентної міді у двовалентну. Кінетична модель реактора описується наступним рівнянням:

$$N_{i0} = \frac{dX}{dt} = r_i V, \quad (1.3)$$

де N_{i0} – кількість молей компонента А, що надходять в реактор;

X – ступінь конверсії;

t – час;

V – об'єм реактору;

r_i – швидкість реакції.

2. Адіабатичний реактор «2», кінетична модель якого описується рівнянням:

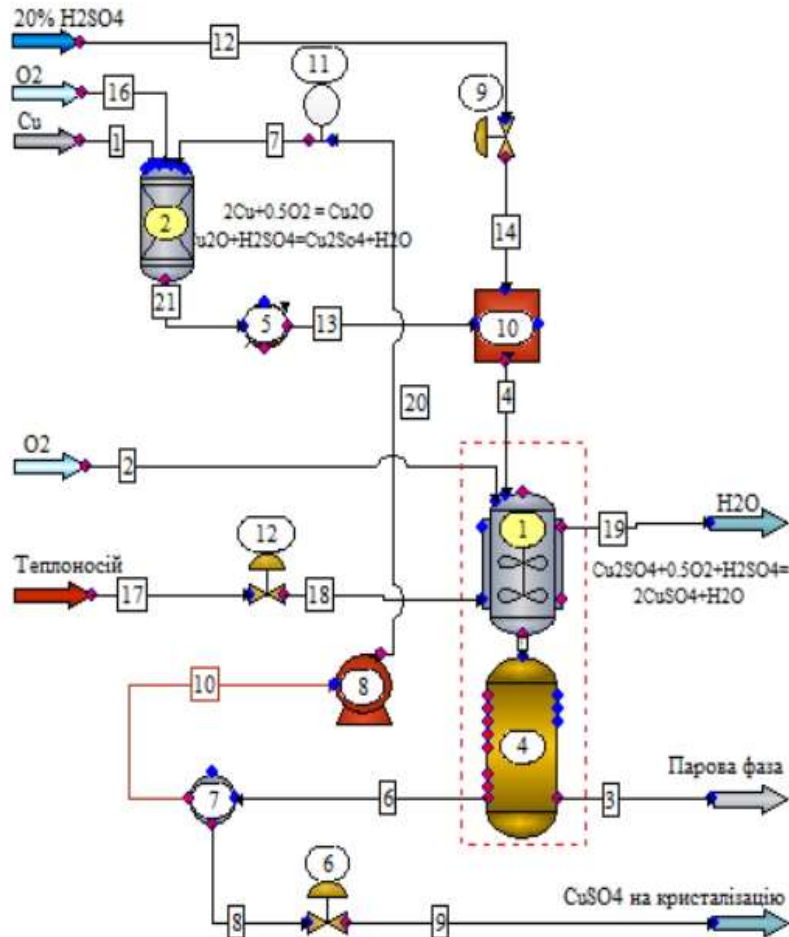


Рис. 1. Структура комп'ютерної моделі процесу отримання розчину мідного купоросу

$$V = \frac{F_{i0}}{-r_i} X, \tag{1.1}$$

- де V – об'єм реактора;
 F_{i0} – вхідна молярна витрата компонента i ;
 X – ступінь конверсії;
 $-r_i$ – швидкість реакції.

Для визначення повної швидкості реакції для одного компоненту розчину використовується наступне рівняння:

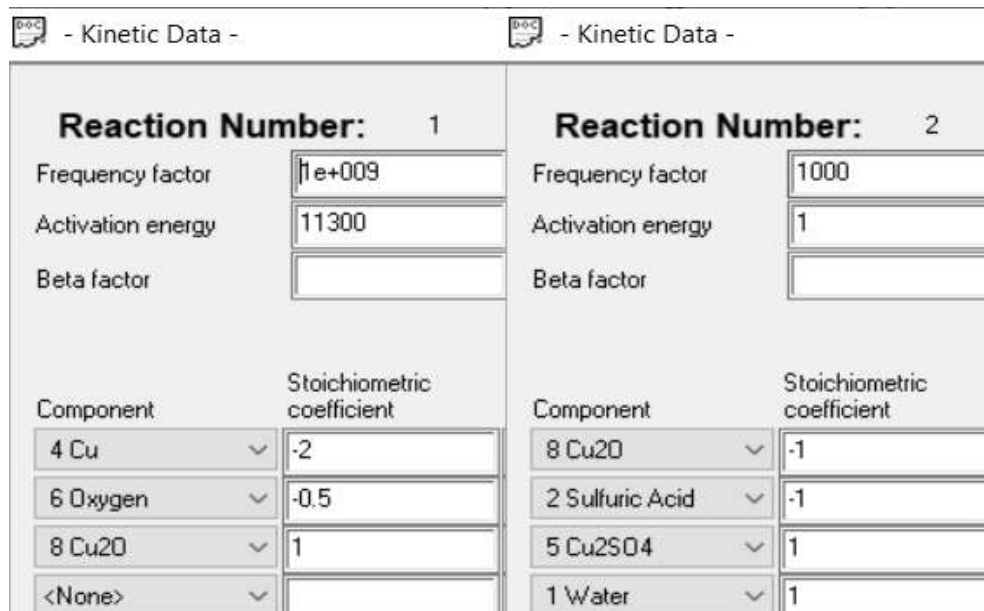
$$r_i = \left(\sum_{j=1}^{nrx} N_{ij} * A_j * e^{-E_j/RT} * \prod_{k=1}^{X_j} (c_k)^{a_{kj}} \right), \tag{1.2}$$

- де r_i – швидкість утворення компонента i , моль/об'єм*час;
 i – індекс для компонента i ;
 k – індекс для реагенту k ;
 j – індекс реакції j ;
 N_{ij} – стехіометричний коефіцієнт для компонента i в реакції j ;
 A_j – коефіцієнт частоти в реакції j ;
 E_j – енергія активації в реакції j ;
 R – універсальна газова постійна;
 T – абсолютна температура;
 c_k – концентрація реагенту k , моль/об'єм;
 a_{kj} – експоненційний множник для реагенту k в реакції j ;
 n – кількість реагентів;
 nrx – кількість реакцій.

Стехіометричні коефіцієнти компонентів, що вступають в реакції, наведені на рисунку 2.

Процес отримання розчину мідного купоросу, реалізований в комп'ютерній моделі протікає наступним чином.

Реагуюча речовина після змішування надходить до теплообмінника «5», який знижує температуру маткового розчину для імітації реальних умов. Після охолодження матковий розчин потрапляє до апарату змішування «10», в який також поступає 20% сірчана кислота. Для керування подачею кислоти передбачено виконавчий механізм «9». Після змішування весь об'єм речовини надходить до основного реактору «1», в який додатково вводиться кисень, для окислення одновалентної міді Cu_2SO_4 до двовалентної CuSO_4 в присутності сірчаної кислоти за допомогою реакції:

Reaction Number: 1		Reaction Number: 2	
Frequency factor	1e+009	Frequency factor	1000
Activation energy	11300	Activation energy	1
Beta factor		Beta factor	
Component	Stoichiometric coefficient	Component	Stoichiometric coefficient
4 Cu	-2	8 Cu2O	-1
6 Oxygen	-0.5	2 Sulfuric Acid	-1
8 Cu2O	1	5 Cu2SO4	1
<None>		1 Water	1

Рис. 2. Стехіометричні коефіцієнти компонентів реакції

Швидкість процесу визначається швидкістю найбільш повільної реакції, а саме швидкістю окислення міді киснем повітря. Це пояснюється малою розчинністю кисню і повільною його дифузиею до поверхні міді. Процес значно прискорюється, коли в розчині вже присутній мідний купорос. В результаті деполяризації CuSO_4 відновлюється міддю до Cu_2SO_4 , а потім Cu_2SO_4 знову окислюється розчинним киснем до CuSO_4 . Таким чином, мідний купорос грає роль переносника кисню. Підвищення температури, прискорює хімічні реакції, але викликає зменшення розчинності кисню, що уповільнює окислення. Тому в реакторі окислення підтримується температура не вище $80\text{--}85^\circ\text{C}$ за допомогою виконавчого механізму «12», який дозує подачу теплоносія в «жакет» обігріву реактора «1». При цьому при окисленні міді використовується приблизно 1/2 кисню, що надходить в реактор. Розчинність кисню зменшується з ростом концентрації CuSO_4 в розчині. Максимум швидкості розчинення спостерігається при концентрації 120 г/л CuSO_4 (для розчину містить ~ 110 г/л H_2SO_4) [12].

Процес змішування в реакторі «1» відбувається до тих пір, поки не буде досягнута необхідна густина маткового розчину, після чого частина розчину відбирається на кристалізацію за допомогою виконавчого механізму «6», а в реактор вводиться такий же об'єм 20% сірчаної кислоти за допомогою виконавчого механізму «9».

З реактору «1» речовина надходить до сепаратору «4» для розділення на рідку та парову фазу, яка відводиться з системи.

Помпа «8» забезпечує циркуляцію маткового розчину в системі реакторів «1» → «2». На вході помпи тиск дорівнює 1.5, а на виході 1.7 атмосфер.

Для розв'язання задачі автоматизованого керування в реальному часі, необхідна комп'ютерна модель, яка дозволяє інформативно відслідкувати кількісні зміни процесу отримання розчину мідного купоросу, тому моделювання в програмі ChemCAD виконувалося у динамічному режимі.

Перевірка адекватності розробленої комп'ютерної моделі виконана шляхом порівняння розрахункових даних, отриманих за допомогою комп'ютерної моделі, з експериментальними даними отриманими з лабораторної установки для отримання мідного купоросу, що функціонує в лабораторії «НДЛ Метрологічного забезпечення екологічного контролю зовнішнього середовища» ДВНЗ УДХТУ.

На рисунку 3 представлена отримана за допомогою комп'ютерної моделі залежність об'ємної концентрації сірчаної кислоти та сульфату міді від часу в матковому розчині.

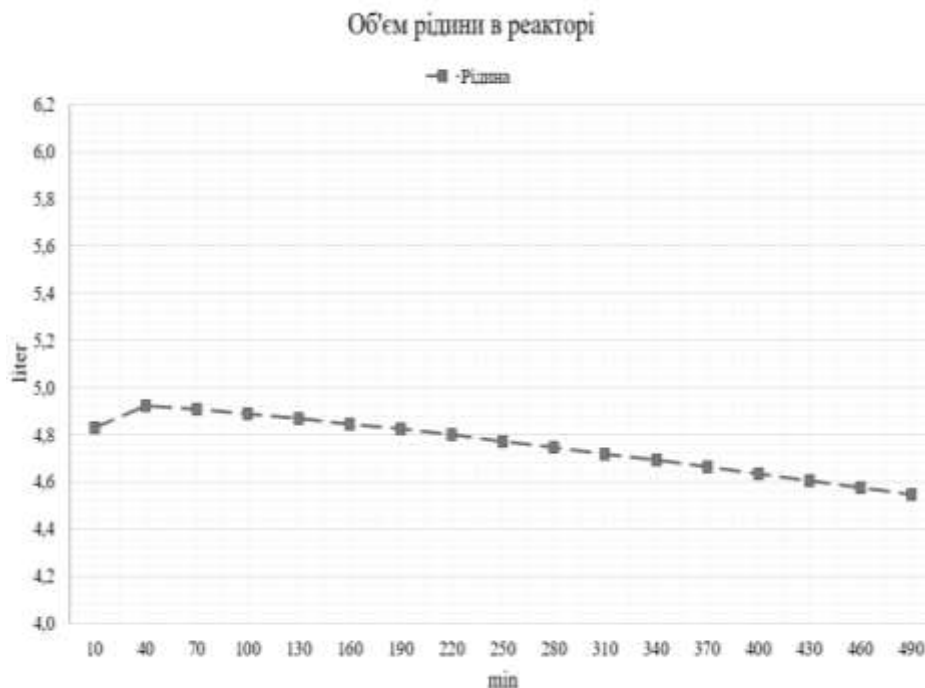
З плином часу в міру окислення мідного брухту концентрація сірчаної кислоти в матковому розчині зменшується, а концентрація сульфату міді, відповідно, зростає. Характер отриманої залежності повністю відповідає реальному процесу.

Отримана за допомогою комп'ютерної моделі залежність зміни об'єму реагуючої речовини в реакторі 1 (рисунок 4) свідчить про незначні втрати об'єму реакційної суміші (0,37 літра) за час поточного циклу функціонування установки (біля 8 годин), що також відповідає реальному процесу. Незначне зниження об'єму рідини в реакторі пояснюється збільшенням паротворенням через високу температуру реакційної суміші (80–85°C), яка є близької до температури кипіння.



Час min	Сульфат міді gmol/min	Сірчана кислота gmol/min
10	0,483	0,934
40	0,503	0,903
70	0,551	0,877
100	0,613	0,844
130	0,685	0,806
160	0,762	0,763
190	0,841	0,719
220	0,922	0,674
250	1,001	0,629
280	1,079	0,585
310	1,154	0,542
340	1,225	0,501
370	1,293	0,462
400	1,357	0,425
430	1,417	0,391
460	1,473	0,358
490	1,514	0,328

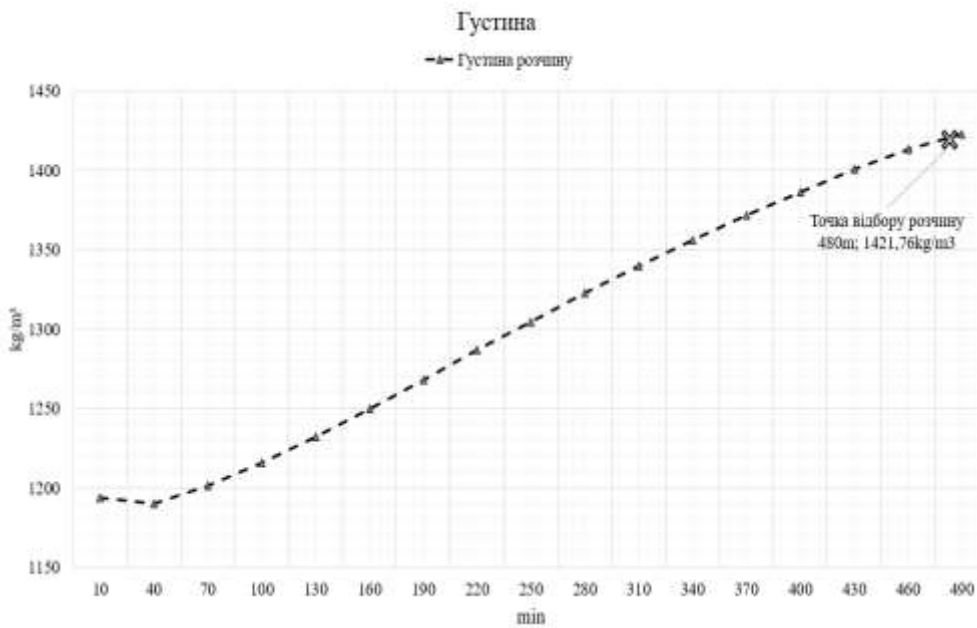
Рис. 3. Об'ємна концентрація сірчаної кислоти та сульфату міді в маточному розчині



Час min	Загальний об'єм рідини liter
10	4,831
40	4,922
70	4,908
100	4,889
130	4,868
160	4,846
190	4,823
220	4,798
250	4,773
280	4,746
310	4,719
340	4,691
370	4,662
400	4,633
430	4,604
460	4,574
490	4,544

Рис. 4. Зміна об'єму рідини в реакторі

На рисунку 5 відображена отримана за допомогою комп'ютерної моделі графічна залежність, що відображає зміну щільності маточного розчину в часі. При отриманні мідного купоросу в промислових умовах маточний розчин відводиться на кристалізацію та сушіння при досягненні показника щільності 1,42 г/см³. При чому циклічність процесу відбору, в залежності від стартових умов процесу, особливостей його апаратної реалізації та технологічного режиму, дорівнює 6–8 годин. Отримана залежність демонструє збільшення густини маточного розчину з показника 1,19 г/см³ до 1,42 г/см³ протягом 8 годин, що загалом відповідає показникам промислових установок.



Час	Густина розчину
min	kg/m ³
10	1193,87
40	1189,78
70	1201,25
100	1215,78
130	1232,27
160	1249,93
190	1268,17
220	1286,55
250	1304,74
280	1322,5
310	1339,66
340	1356,09
370	1371,73
400	1386,52
430	1400,45
460	1413,52
490	1422,87

Рис. 5. Зміна густини маточного розчину з часом

Порівняльний аналіз часу тривалості одного циклу отримання розчину мідного купоросу по комп'ютерній моделі з показниками лабораторної установки, на якій реалізований аналогічний з моделлю технологічний режим, показав похибку розрахунку тривалості циклу біля 12 хвилин. Це вочевидь пояснюється не ідеальною реалізацією моделей окремих апаратів в універсальній моделюючій програмі ChemCAD. Крім того, щосекундний прорахунок комп'ютерної моделі в динаміці, загальною тривалістю в кілька годин віртуального часу, надає помилці розрахунку накопичувальний характер, чим суттєво збільшує її.

У той же час наявна похибка розрахунку тривалості циклу в 2,5% не робить істотного негативного впливу на основне цільове призначення розробленої комп'ютерної моделі процесу отримання мідного купоросу і дозволяє її використовувати при розробці та налагодженні систем управління.

В даний час SCADA системи (Supervisory Control and Data Acquisition – диспетчерське управління і збір даних) [13] є однією з найбільш розповсюджених та перспективних технологій в області автоматизованого управління в сучасному світі. Популярність SCADA пояснюється тим, що ці системи дозволяють створювати як ефективні людино-машинні інтерфейси (HMI), так і реалізовувати алгоритми керування практично будь-якої складності. Основним інструментом в SCADA для обміну інформацією з зовнішнім світом є технологія OPC (Open Platform Communication) [14].

Універсальна моделююча програма ChemCAD, в середовищі якої розроблена комп'ютерна модель процесу отримання мідного купоросу, також підтримує технологію OPC та має вбудований OPC сервер. Це дозволяє моделям розробленим в програмі ChemCAD виступати в якості джерела і приймача даних для зовнішніх SCADA, причому параметри OPC сервера ChemCAD можливо розглядати як віддалені технічні засоби автоматизації, а саме як датчики, що вимірюють параметри технологічного процесу та регулюючі клапани, що змінюють витрати матеріальних потоків.

Розроблена структурна схема інформаційного обміну між комп'ютерною моделлю процесу отримання мідного купоросу та популярною і поширеною SCADA Trace Mode 6 наведена на рисунку 6.

Для реалізації керування в SCADA процесом отримання мідного купоросу по розробленій комп'ютерній моделі передбачено інформаційний обмін за наступними параметрами OPC серверу ChemCAD:

- **Streams.Stream 6.Component.3 Cupric Sulfate**, потік 6, концентрація мідного купоросу на виході з реактора, г/л, вимірюваний параметр;
- **Streams.Stream 6.Component.2 Sulfuric Acid**, потік 6, концентрація сірчаної кислоти на виході з реактора, г/л, вимірюваний параметр;
- **UnitOperations.Unit1.46 Calc liquid volume.Value**, реактор «1», розрахунок загального об'єму рідини, л, вимірюваний параметр;
- **Streams.Stream6.Properties.46 Liquid actual density.Value**, потік 6, густина маткового розчину на виході з реактору, г/см³, вимірюваний параметр;
- **UnitOperations.Unit6.11 Valve position %.Value**, виконавчий механізм «6», ступінь відкриття 0-100%, керований параметр, відбір маточного розчину на кристалізацію та сушіння;
- **UnitOperations.Unit9.11 Valve position %.Value**, виконавчий механізм «9», ступінь відкриття 0-100%, керований параметр, додавання 20% сірчаної кислоти.

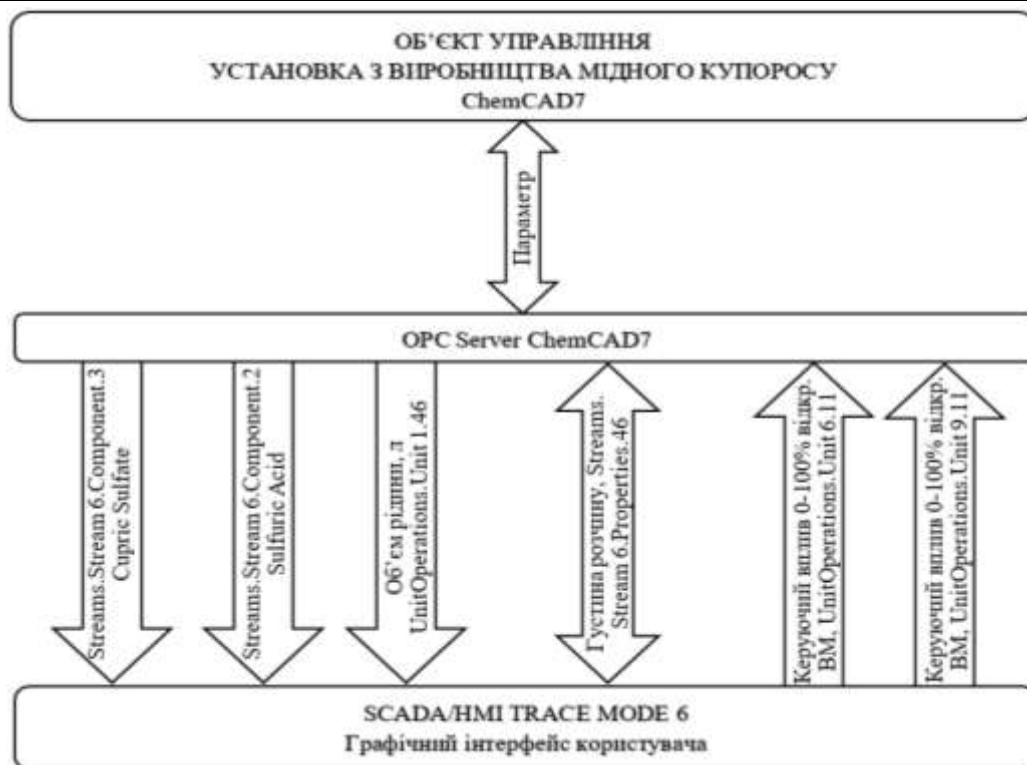


Рис. 6. Схема інформаційного обміну ChemCAD ↔ OPC ↔ SCADA

Підтримання відповідної температури в реакторі «1» шляхом подачі теплоносія в «жакет» обігріву, реалізовано за допомогою локального регулятора «11», що керує виконавчим механізмом «12» безпосередньо в ChemCAD, без використання технології OPC.

Висновок. В універсальній моделюючій програмі ChemCAD розроблена комп'ютерна модель динаміки процесу отримання розчину мідного купоросу, адаптована для вирішення задач автоматизованого керування. Наведена структура розробленої моделі. За моделлю отримані залежності концентрації сірчаної кислоти та сульфату міді в реакційному розчині, змін об'єму рідини в реакторі та густини реакційного розчину. Виконаний порівняльний аналіз розрахункових даних з експериментальними, отриманими з лабораторної установки для отримання розчину мідного купоросу. Розроблені принципи інтеграції розробленої моделі в сучасні SCADA системи. Також розроблена структура інформаційного обміну між комп'ютерною моделлю процесу отримання розчину мідного купоросу та системою керування на базі SCADA Trace-Mode 6 за допомогою технології OPC.

Література

1. Основи моделювання хіміко-технологічних систем : навчальний посібник / [О. М. Пахомов, В. І. Коновалов, Н. Ц. Гапапова, А. Н. Коліух]. – Тамбов : Вид-во Тамбо. держ. техн. ун-ту, 2008. – 80 с.
2. Ляпощенко А.А. Статичне та динамічне моделювання хіміко-технологічних процесів в CHEMCAD / А.А. Ляпощенко, Ю.Ю. Басанец // Сучасні технології у промисловому виробництві. – Суми : СумДУ, 2016. – Ч. 2. – С. 82.
3. Thermodynamic study of the Cu-Na-H-SO₄-Cl-HSO₄-H₂O system for the solubility of copper sulfate in acid seawater at different temperatures. Francisca J. Justel, María E. Taboada, Yecid P. Jimenez. Journal of Molecular Liquids, 2018. No. 249. P. 702–709.
4. Seliem, M.K., El-Mahrouk, M.E., El-Banna, A.N., Hafez, Y.M., Dewir Y.H. Micropropagation of Philodendron selloum: Influence of copper sulfate on endophytic bacterial contamination, antioxidant enzyme activity, electrolyte leakage, and plant survival. South African Journal of Botany, 2021. No. 13. P. 230–240.
5. Мінеєв В.Г. Використання мідного купоросу в сільському господарстві : навчальний посібник / В.Г. Мінеєв, В.Г. Сичов, Г.П. Гамзиков. – М. : Вид-во ВНПА ім. Д.Н. Прянішнікова, 2017. – 854 с.
6. Мартинкевич А.А. Пігменти для сучасних фарбових матеріалів : навчальний посібник / А.А. Мартинкевич, Н.П. Прокопчук. – Мінськ : БДТУ, 2014. – 130 с.
7. Кароматов І.Д. Мідь та її призначення в медицині / І.Д. Кароматов, П.Т. Тураєв // Біологія та інтегративна медицина. – 2011. – № 11. – С. 207.
8. Россівал Л. Сторонні речовини і харчові добавки в продуктах : навчальний посібник / Л. Россівал, Р. Энгст, А. Соколай. – М. : Легка та харчова промисловість, 1982. – 264 с.
9. Лебідь А.Б. Отримання сульфату міді та нікеля сірчанокислотного на ВАТ «Уралелектромідь» : навчальний посібник / А.Б. Лебідь, Л.Ф. Акулич, С.С. Набойченко. – Єкатеринбург : Вид-во Урал. Ун-та,

2015. – 136 с.

10. Позін М.Е. Виробництво мінеральних солей : навчальний посібник / М.Е. Позін. – Л. : Хімія, 1974. – 792 с.

11. Збірник доповідей IV Міжнародної наукової конференції аспірантів і студентів "Охорона навколишнього середовища та раціональне використання природних ресурсів". – Донецьк : ДонНТУ, 2005.

12. Батура Д.О. СИСТЕМА АВТОМАТИЗОВАНОГО УПРАВЛІННЯ ВІДЦІЛЕННЯМ ВИЛУГОВУВАННЯ МІДИ З МІДНОГО БРУХТУ / Д.О. Батура, О.П. Мисов // ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет». – Дніпро, 2020. – 2 с.

13. SCADA система Trace Mode 6 : навчальний посібник. – Казань : Вид-во Казан. держ. технол. ун-ту, 2011. – 128 с.

14. Hoffmann, M., Büscher, C., Meisen, T., Jeschke S. Continuous integration of field level production data into top-level information systems using the OPC interface standard. *Procedia CIRP*, 2016. No. 41. P. 496–501.

References

1. Osnovy modeliuвання khimiko-tekhnolohichnykh system : navchalnyi posibnyk / [O. M. Pakhomov, V. I. Konvalov, N. Ts. Hataпова, A. N. Koliukh]. – Tambov : Vyd-vo Tambo. derzh. tekhn. un-tu, 2008. – 80 s.

2. Liaposhchenko A.A. Statychnе ta dynamichne modeliuвання khimiko-tekhnolohichnykh protsesiv v CHEMCAD / A.A. Liaposhchenko, Yu.Iu. Basanets // Suchasni tekhnolohii u promyslovomu vyrobnytstvi. – Sumy : SumDU, 2016. – Ch. 2. – S. 82.

3. Thermodynamic study of the Cu-Na-H-SO₄-Cl-HSO₄-H₂O system for the solubility of copper sulfate in acid seawater at different temperatures. Francisca J. Justel, María E. Taboada, Yecid P. Jimenez. *Journal of Molecular Liquids*, 2018. No. 249. P. 702–709.

4. Seliem, M.K., El-Mahrouk, M.E., El-Banna, A.N., Hafez, Y.M., Dewir Y.H. Micropropagation of *Philodendron selloum*: Influence of copper sulfate on endophytic bacterial contamination, antioxidant enzyme activity, electrolyte leakage, and plant survival. *South African Journal of Botany*, 2021. No. 13. P. 230–240.

5. Mineiev V.H. Vykorystannia midnoho kuporosu v silskomu hospodarstvi : navchalnyi posibnyk / V.H. Mineiev, V.H. Sychov, H.P. Hamzykov. – M. : Vyd-vo VNIIA im. D.N. Prianishnykova, 2017. – 854 s.

6. Martynkevych A.A. Pihmenty dlia suchasnykh farbovykh materialiv : navchalnyi posibnyk / A.A. Martynkevych, N.P. Prokopchuk. – Minsk : BDTU, 2014. – 130 s.

7. Karomatov I.D. Mid ta yii pryznachennia v medytsyni / I.D. Karomatov, P.T. Turaev // Biolohiia ta intehratyvna medytsyna. – 2011. – № 11. – S. 207.

8. Rossival L. Storonni rechovyny i kharchovi dobavky v produktakh : navchalnyi posibnyk / L. Rossival, R. Эnhst, A. Sokolai. – M. : Lehka ta kharchova promyslovist, 1982. – 264 s.

9. Lebid A.B. Otrymannia sulfatu midu ta nikelia sirchanokyslotnoho na VAT «Uralektromid» : navchalnyi posibnyk / A.B. Lebid, L.F. Akulych, S.S. Naboichenko. – Yekaterynburh : Vyd-vo Ural. Un-ta, 2015. – 136 s.

10. Pozin M.E. Vyrobnnytstvo mineralnykh solei : navchalnyi posibnyk / M.E. Pozin. – L. : Khimiia, 1974. – 792 s.

11. Zbirnyk dopovidei IV Mizhnarodnoi naukovoї konferentsii aspirantiv i studentiv "Okhorona navkolysnogo seredovyscha ta ratsionalne vykorystannia pryrodnykh resursiv". – Donetsk : DonNTU, 2005.

12. Batura D.O. Systema avtomatyzovanoho upravlinnia viddilenniam vyluhovuvannia midu z midnoho brukhtu / D.O. Batura, O.P. Mysov // DVNZ «Ukrainskyi derzhanyi khimiko-tekhnolohichnyi universytet». – Dnipro, 2020. – 2 s.

13. SCADA systema Trace Mode 6 : navchalnyi posibnyk. – Kazan : Vyd-vo Kazan. derzh. tekhnol. un-tu, 2011. – 128 s.

14. Hoffmann, M., Büscher, C., Meisen, T., Jeschke S. Continuous integration of field level production data into top-level information systems using the OPC interface standard. *Procedia CIRP*, 2016. No. 41. R. 496–501.