

## ВИКОРИСТАННЯ ІМІТАЦІЙНИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ РОБОТИ КОНТАКТНОГО АПАРАТУ У ВИРОБНИЦТВІ СІРЧАНОЇ КИСЛОТИ

*В сучасному світі в зв'язку з швидким розвитком комп'ютерної техніки і програмних засобів широкого застосування знайшли імітаційні моделі для об'єктів керування. У наведений механізм побудови імітаційної моделі контактного апарату у виробництві сірчаної кислоти. Показані графіки реакцій температур при ступінчатій зміні концентрації та температури газу, а також графіки, що демонструють реакції температури та концентрації газу на короткотривалі збурення. Після проведення аналізу отриманих результатів зроблено висновки щодо критичності відхилень температури та концентрації газу від норми.*

**Ключові слова:** імітаційна модель, сірчана кислота, перехідний процес, збурення, концентрація, температура.

© Миленький В. В., Зань О. В., Долинюк Б. С., 2018.

**Постановка проблеми.** Значна кількість процесів у хімічній промисловості є неперервними і виробництво триває цілодобово. Зупинка таких процесів призводить до значних економічних втрат. Проведення активного експерименту на виробництві ускладнене (через необхідність зупинки виробничого процесу та ризик пошкодження дослідником промислового обладнання). Проведення ж пасивного експерименту часто не дає досліднику достатньої інформації про спостережуваний об'єкт (через дуже малі відхилення вхідних сигналів об'єкта і неможливість впливу дослідником на кожний вхідний сигнал окремо). Привабливою альтернативою в цьому випадку є створення імітаційної моделі.

**Метою статті** є публікація результатів використання імітаційних моделей для оптимізації роботи контактного апарату у виробництві сірчаної кислоти.

**Актуальність проблеми.** Створення імітаційної моделі вирішує багато проблем. Є можливість задавати будь-які значення вхідних сигналів незалежно один від одного. Є можливість моделювати аварійні ситуації. У сучасному світі, перехідні процеси в хімічній промисловості тривають впродовж багатьох годин. За допомогою комп'ютерних імітаційних моделей інформацію про перехідний процес можна отримати майже миттєво (в залежності від кількості обчислень і потужності обчислювальної техніки).

Прикладом довготривалого неперервного процесу може бути процес контактного окислення у виробництві сірчаної кислоти. Окислення сірчастого ангідриду  $SO_2$  в сірчаній  $SO_3$  відбувається в контактних апаратах за присутності ванадієвого каталізатора. Всередині апарата знаходяться чотири шари контактної маси. Контактна маса розміщена на решітках. Одним з основних показників якості роботи контактних апаратів є ступінь контактування  $x_p$ , який обчислюється за формулою

$$x_p = \frac{P_{SO_2}}{P_{SO_2} + P_{SO_3}}$$

де  $P_{SO_2}$  та  $P_{SO_3}$  – парціальні тиски  $SO_2$  та  $SO_3$  у газі після окислення.

Ступінь контактування на кожному шарі каталізатора залежить від температури газу. Для ванадієвого каталізатора контактування починається при 400 °С, причому максимум контактування, який відповідає рівноважному ступеню контактування, з підвищенням температури знижується [1].

Основними збуреннями є зміна концентрації та температури газу на вході контактної відділення (при зміні концентрації змінюється кількість тепла, що виділяється при реакції окислення, а це суттєво впливає на температурний режим в апараті). На реальному об'єкті ці збурення зазвичай обмежуються і дуже малі (великі відхилення цих двох параметрів призводять до аварійних ситуацій). Щоб дослідити реакцію контактної апарату на довільний сигнал (за величиною і формою) необхідно створити імітаційну модель.

На реальному об'єкті система автоматичного керування підтримує сталі температури газу на вході до кожного шару контактної маси (каталізатора). Як правило температури газу на входах до кожного шару лежать у межах 420 – 450 °С [2]. Максимальна ж температура на виході з шару каталізатора складає близько 600 °С. Зниження температури газу до 400 °С і нижче призводить до зупинки реакції (а це є неприпустимим у неперервному виробництві). Перехідні процеси в контактному апараті тривають декілька годин. Новий запуск процесу обумовлює значні втрати часу (тобто – збиток). Підвищення ж температури до 650 °С і вище призводить до перегріву каталізатора і його псування. В цьому разі необхідно зупинити процес і замінювати каталізатор (а це є дуже значні матеріальні витрати). Зрозуміло, що проведення активного експерименту

просто неприпустиме. Імітаційна ж модель дає можливість як завгодно впливати на температурний режим всередині контактного апарату. Є можливість досліджувати температурні режими близькі до аварійних (при температурі на вході до одного з шарів каталізатора близько або температурі на виході з одного з шарів каталізатора близько 650 °C).

**Створення імітаційної моделі.** Для створення імітаційної моделі необхідно перш за все формалізувати об'єкт. Для математичного моделювання поведінки об'єкта (динаміки і статички) зручно використовувати систему диференціальних рівнянь. Диференціальні рівняння можна отримати аналітично з матеріальних балансів. Також можна отримати диференціальні рівняння після обробки результатів пасивного або активного експерименту.

Систему диференціальних рівнянь для температур в контактному апараті в неперервному вигляді можна записати в наступному вигляді [3]:

$$T_2 x_2' + x_2 = K_1 x_1 + K_2 x_7 (t - \tau_0);$$

$$T_3 x_3' + x_3 = K_3 x_2 + K_4 x_5 (t - \tau_0);$$

$$x_4 = m x_3;$$

$$T_5 x_5' + x_5 = x_4 + \varepsilon_1 \Theta S;$$

$$T_6 x_6' + x_6 = K_3 x_5 + K_4 x_2 (t - \tau_0);$$

$$T_7 x_7' + x_7 = x_6 + \varepsilon_2 \Theta S;$$

$$T_8 x_8' + x_8 = K_1 x_7 + K_2 x_1 (t - \tau_0);$$

$$T_9 x_9' + x_9 = x_8 + \varepsilon_3 \Theta S;$$

$$T_{10} x_{10}' + x_{10} = x_9 + \varepsilon_4 \Theta S.$$

Для реалізації імітаційного моделювання комп'ютерними засобами необхідна модель у дискретному вигляді. Система диференціальних рівнянь для температур в контактному апараті в дискретному вигляді:

$$x_2(n+1) = (K_1 x_1(n) + K_2 x_7(n - n\tau) - x_2(n)) \frac{\Delta t}{T_2} + x_2(n);$$

$$x_3(n+1) = (K_3 x_2(n) + K_4 x_5(n - n\tau) - x_3(n)) \frac{\Delta t}{T_3} + x_3(n);$$

$$x_4(n+1) = m x_3(n+1);$$

$$x_5(n+1) = (x_4(n) + \varepsilon_1 \Theta S(n) - x_5(n)) \frac{\Delta t}{T_5} + x_5(n);$$

$$x_6(n+1) = (K_3 x_5(n) + K_4 x_2(n - n\tau) - x_6(n)) \frac{\Delta t}{T_6} + x_6(n);$$

$$x_7(n+1) = (x_6(n) + \varepsilon_2 \Theta S(n) - x_7(n)) \frac{\Delta t}{T_7} + x_7(n);$$

$$x_8(n+1) = (K_1 x_7(n) + K_2 x_1(n - n\tau) - x_8(n)) \frac{\Delta t}{T_8} + x_8(n);$$

$$x_9(n+1) = (x_8(n) + \varepsilon_3 \Theta S(n) - x_9(n)) \frac{\Delta t}{T_9} + x_9(n);$$

$$x_{10}(n+1) = (x_9(n) + \varepsilon_4 \Theta S(n) - x_{10}(n)) \frac{\Delta t}{T_{10}} + x_{10}(n).$$

де  $T_2$  і  $T_3$  – сталі часу внутрішніх теплообмінників для сірчистого газу, що нагрівається;

$T_6$  і  $T_8$  – сталі часу внутрішніх теплообмінників газу, що нагрівається;

$K_1, K_2, K_3, K_4$  – коефіцієнти підсилення;

$T_5, T_6, T_9, T_{10}$  – сталі часу шарів контактної маси;

$\Theta$  – температура, на яку нагріється газ концентрації 1% SO<sub>2</sub> при повному окисленні;

$S$  – концентрація сірчистого газу SO<sub>2</sub> на вході в апарат;

$\varepsilon$  – ступінь контактування в шарі;

$\tau_0$  – час запізнювання в об'єкті регулювання внутрішнього теплообмінника;

$t$  – час;

$m$  – коефіцієнт;

$x_1$  – температура газу на вході до контактного апарата;

$x_2$  – температура газу на виході з міжтрубного простору другого теплообмінника та температура на вході до міжтрубного простору першого теплообмінника;

$x_3$  – температура газу на виході з міжтрубного простору першого теплообмінника;

$x_4$  – температура газу на вході до першого шару каталізатора;

$x_5$  – температура газу на виході з першого шару каталізатора та на вході до труб першого теплообмінника;

$x_6$  – температура газу на виході з труб першого теплообмінника та на вході до другого шару каталізатора;

$x_7$  – температура газу на виході з другого шару каталізатора та на вході до труб другого теплообмінника;

$x_8$  – температура газу на виході з труб другого теплообмінника та на вході до третього шару каталізатора;

$x_9$  – температура газу на виході з третього шару каталізатора та на вході до четвертого шару каталізатора

(оскільки площа третього теплообмінника дуже мала порівняно з двома іншими теплообмінниками, то можна вважати, що температура газу при проходженні крізь нього майже не змінюється);

$x_{10}$  – температура газу на виході з четвертого шару каталізатора.

Підставивши в ці рівняння початкові умови (значення температур для перших  $(n+1)$  кроків) можна обчислити реакцію об'єкта на будь-які вхідні сигнали (концентрація  $S$  та температура  $x_1$  газу на вході). Для проведення імітаційного моделювання підійдуть програми *MathCAD* та *MatLab*. Для створення комп'ютерних імітаційних моделей зі зручним інтерфейсом можна використати середовища *Delphi* або *C++ Builder* (автори статті використали *Delphi*).

Результати моделювання наведені на рис. 1. Тут зображені реакції температур (прирости) при ступінчатій зміні концентрації  $S$  газу на вході на 1% (номінальною концентрацією є 7–7,5%). По осі абсцис відкладений час в хвиликах.

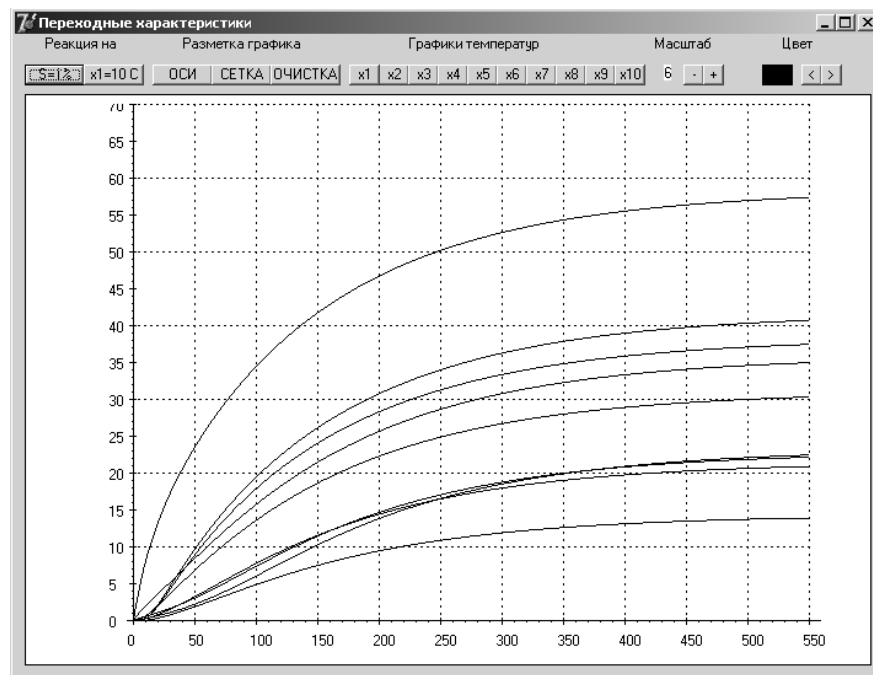
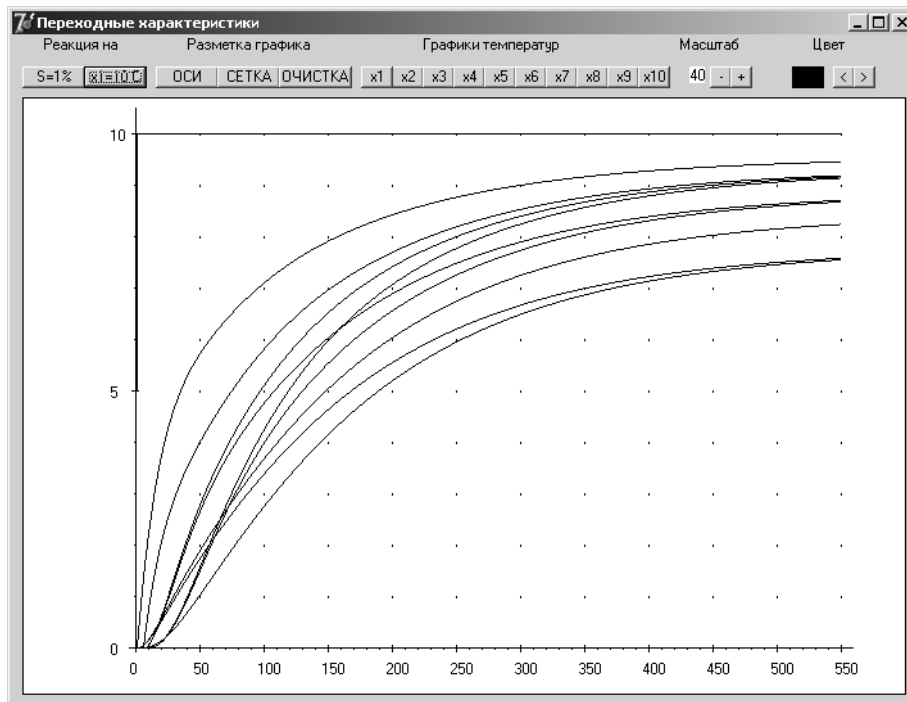


Рис. 1 – Реакції температур (прирости) при ступінчатій зміні концентрації  $S$  газу на вході на 1%

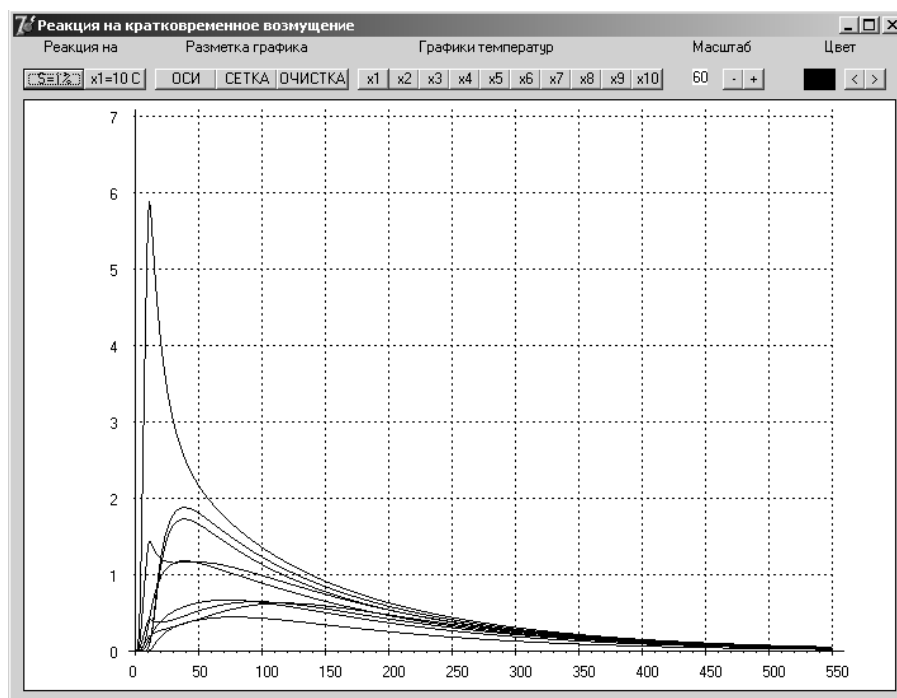
Як бачимо, максимальне відхилення температури складає майже 60 °С. Результати моделювання показали, що збільшення концентрації на один відсоток призводить до значного підвищення температур в різних точках контактного апарату. Робимо висновок, що таке підвищення концентрації газу на виробництві недопустиме, бо призвело б до перегріву каталізатора (одразу з бачимо перевагу імітаційної моделі). Тепер подивимось як об'єкт (контактний апарат) реагує на ступінчасту зміну температури  $x_1$  газу на вході на 10 °С (рис. 2).



**Рис. 2 – Реакції температур (прирости) при ступінчатій зміні температури  $x_1$  газу на вході на 1%**

Як бачимо, максимальне відхилення, складає близько 9 °С. Це може призвести до незначної зміни ступеня контактування, але не є критичним.

На виробництві на контактний апарат можуть діяти короткотривалі збурення (10 – 15 хв) концентрації  $S$  газу  $SO_2$  або температури  $x_1$  газу  $SO_2$ . На рис. 3. наведені реакції на збурення концентрації тривалістю десять хвилин і амплітудою в 1 %.



**Рис. 3 – Реакція на короткотривале збурення концентрації газу  $S$**

Як бачимо, при цьому максимальне відхилення менше 6 °С, що не є критичним. Всі інші відхилення досить малі.

На рис. 4. зображена реакція за збурення температури амплітудою 10 °С.

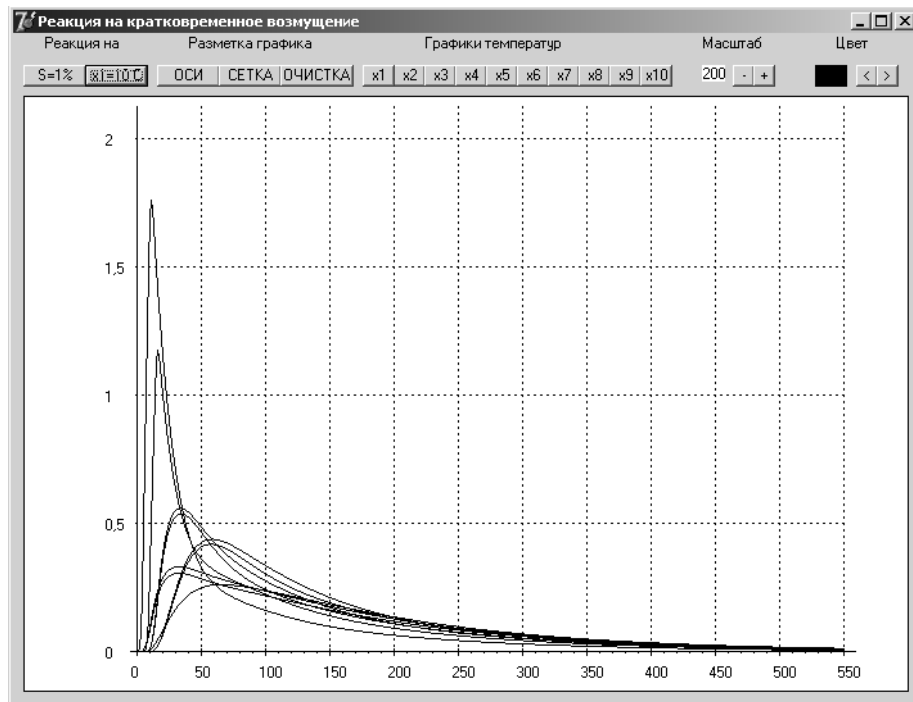


Рис. 4 – Реакція на короткотривале збурення температури газу  $x_1$

Результати досліджень дають можливість зробити висновок, що відхиленнями температур в цьому випадку можна знехтувати.

Вище згадувалось, що ступінь контактування залежить від температури газу. Він буде найбільшим при температурі газу близькій до  $400\text{ }^{\circ}\text{C}$  і з підвищенням температури ступінь контактування зменшується. Поставимо задачу підтримання такої середньої температури, щоб загальний ступінь контактування (на всіх чотирьох шарах каталізатора) був якнайбільшим. При цьому повинні виконуватись наступні обмеження. Температура газу на вході до будь-якого шару каталізатора не повинна бути меншою ніж  $400\text{ }^{\circ}\text{C}$  (бо реакція може припинитись). Температура газу на виході з будь-якого шару каталізатора не повинна перевищувати  $650\text{ }^{\circ}\text{C}$  (це може призвести до псування каталізатора).

На рис. 5. зображені поверхні рівня середньої температури  $Kr$  в апараті залежно від концентрації  $S$  (в процентах %) газу  $SO_2$  та температури газу  $x_1$  ( $Kr = f(S, x_1)$ ).

Як видно з результатів моделювання, однакові значення середніх температур (рівнів) розташовуються вздовж прямих. Цю поверхню можна використати при розробці системи автоматичного керування. Поставимо задачу підтримувати такий температурний режим, при якому середня температура знаходилась би у другій області (зелена область). При цьому керування було би близьким до оптимального і не було би ризику зупинки реакції в разі раптового потрапляння в зону зупинки реакції (біла область).

**Висновок.** За результатами проведеного імітаційного моделювання можна зробити наступні висновки:

1. Об'єкт є майже не чутливим до короткотривалих збурень. Тобто немає необхідності проектувати систему автоматичного керування з високою швидкістю. Рекомендуються сталі часу для систем керування концентрацією і температурою газу приблизно рівні 10 хвилинам.

2. Найбільш небезпечним для процесу контактного окислення є підвищення концентрації  $SO_2$ . Номінальною концентрацією є  $7,4\%$ . При підвищенні концентрації газ необхідно розбавляти повітрям (для нормалізації концентрації). При розробці системи автоматичного керування слід враховувати наступні обмеження: максимальне статичне відхилення концентрації  $\pm 0,1\%$ ; максимальне динамічне (короткотривале) відхилення концентрації  $\pm 1\%$ .

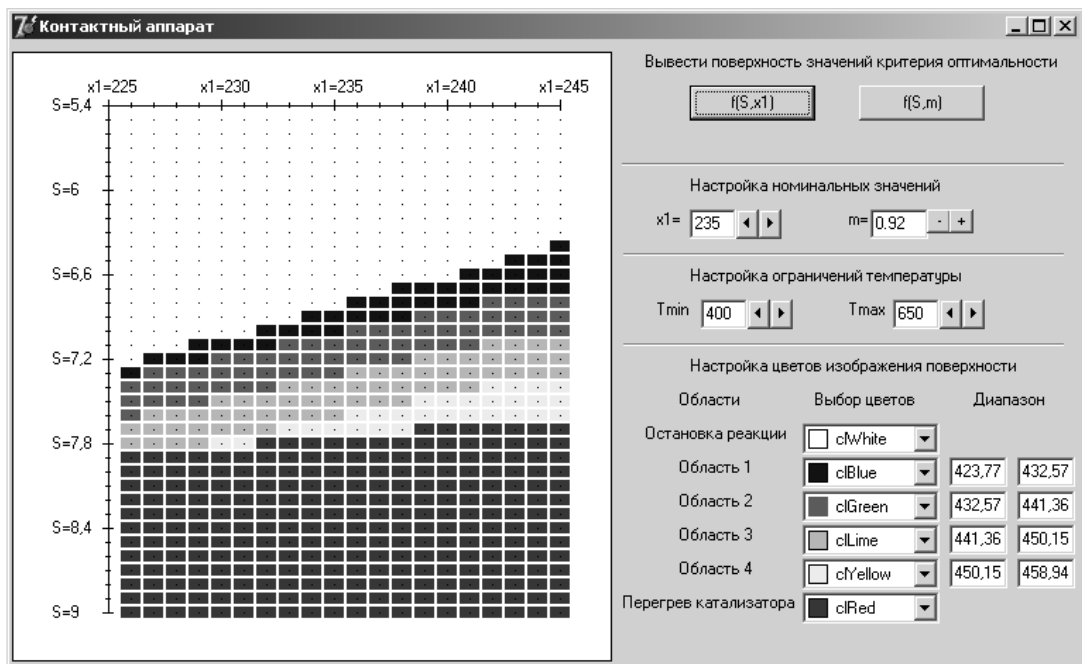


Рис. 5 – Зображення поверхень рівня середньої температури  $f(S, x_1)$

3. Бажаними (близькими до оптимальних) є завдання температури і концентрації в межах другої області (рис. 5). Залежність між оптимальною температурою і концентрацією вхідного газу близька до лінійної (рис. 5). Тобто алгоритм керування наступний: при концентрації  $S > 7,4\%$  розбавити його повітрям, при концентрації  $S \leq 7,4\%$  змінювати температуру газу на вході до апарату за лінійним законом  $x_1 = -25 \cdot S + 415$

#### Список використаної літератури:

1. Боресков Г.К. Катализ в производстве серной кислоты. М. – Л. Госхимиздат, 1954, 348 с.
2. Амелин А.Г. Производство серной кислоты. М. – Госхимиздат, 1956, с. 184-235, 407-412.
3. Фиалко Г.М. Автоматизация производства серной кислоты. М. – «Машиностроение», 1964, с. 335-349.

Надійшла до редакції 21.05.2018