

The analysis of filters for water purification showed that they are mainly intended to reduce rigidity, turbidity, purification of iron, sulfates, chlorides, nitrates and organic impurities. The proposed work is devoted to increasing the efficiency of water purification from such elements as magnesium, calcium, tri-potassium and potassium, or more precisely, to normalize these indicators to the values defined by the state standard, which involves the introduction of appropriate ion-exchange filters.

The aim of this article is to develop a control system algorithm, which increases the efficiency of the stage of fine water purification by forming the optimal structure of the module of ion exchange filters and determining the appropriate flow of purified water.

It has been determined that the ion exchange filter is a periodic apparatus and, in order to ensure the continuity of the purification process, the filter module must contain backup capacities in the form of additional filters of different purposes, which creates the preconditions for optimizing the structure of the specified filter module.

On the basis of the analysis of the current state of the equipment for purification of drinking water, an algorithm for determining the optimal structure of the module for ion exchange filters and the corresponding flow of purified water is investigated. Implementation of the control system based on the given algorithm will increase the efficiency of the stage of fine purification of the installation of water treatment.

Keywords: drinking water, water preparation, ion exchange filter, control system.

References

1. DSTU 7525:2014 [Drinking water. Requirements and methods of quality control. National Standard of Ukraine]. Ministry of Economic Development and Trade of Ukraine, Kyiv. Binnie C. and Kimber M. (2013). "Basic water treatment", ICE Publishin, London.
 2. Basic water treatment / Chris Binnie and Martin Kimber. – London: ICE Publishin, 2013. – 280 p.
 3. Odintsov K. U., Sobol A. S. and Hofman I. N. (1974). "Hydrodynamic abilities of ion-exchange filters". Proceedings of MITHT, Moscow, USSR, vol. 4, iss. 1, pp. 45–47.
 4. Sobol A. S., Komarov I. V., Odintsov K. U. [and etc.] (1975). "Application of mathematical model for calculation of industrial ion-exchange filter". Proceedings of MITHT, Moscow, USSR, vol. 5, iss. 1, pp. 185–189.
 5. Seniavin M. M., Rubinstine R. N., Venitsianov E. V. [and etc.] (1972). "Basics of calculation and optimization of ion-exchange processes". Nauka, Moscow, USSR.
 6. Zakova I. M., Komarova I. V., Odintsov K. U. and Lebedev V. U. (1983). "Modeling of technological processes in ion-exchange filters". Thermal Engineering, Moscow, USSR. no. 7, pp. 13–16.
-

УДК 66-661

МИЛЕНЬКИЙ В. В., к.т.н., доц.; ЗАНЬ О. В., магістрант; ДОЛИНЮК Б. С., магістрант
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

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 ступінчастій зміні концентрації та температури газу, а також графіки, що демонструють реакції температури та концентрації газу на короткотривале 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.

DOI: 10.20535/2306-1626.1.2018.143432

© Миленський 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 вплину 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 сірчистого ангідриду SO_2 в сірчаний SO_3 відбувається в контактних апаратах за присутності ванадієвого катализатора. Всередині апарату 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 катализатора залежить від температури газу. Для ванадієвого катализатора контактування починається при 400°C , причому максимум контактування, який відповідає рівноважному ступеню контактування, з підвищенням температури знижується [1].

Основними збуреннями є зміна концентрації та температури газу на вході контактного 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 контактного апарату на довільний сигнал (за величиною і формулою) необхідно створити імітаційну модель.

На реальному об'єкті система автоматичного керування підтримує сталі температури газу на вході до кожного шару контактної маси (катализатора). Як правило температури газу на входах до кожного шару лежать у межах $420 - 450^{\circ}\text{C}$ [2]. Максимальна ж температура на виході з шару катализатора складає близько 600°C . Зниження температури газу до 400°C 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°C і вище призводить до перегріву катализатора і його псуванню. В цьому разі необхідно зупиняти процес і замінювати катализатор (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 катализатора близько або температурі на виході з одного з шарів катализатора 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 статики) 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]:

$$T_2 x'_2 + x_2 = K_1 x_1 + K_2 x_7(t - \tau_0);$$

$$T_3x'_3 + x_3 = K_3x_2 + K_4x_5(t - \tau_0);$$

$$x_4 = mx_3;$$

$$T_5x'_5 + x_5 = x_4 + \varepsilon_1\Theta S;$$

$$T_6x'_6 + x_6 = K_3x_5 + K_4x_2(t - \tau_0);$$

$$T_7x'_7 + x_7 = x_6 + \varepsilon_2\Theta S;$$

$$T_8x'_8 + x_8 = K_1x_7 + K_2x_1(t - \tau_0);$$

$$T_9x'_9 + x_9 = x_8 + \varepsilon_3\Theta S;$$

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

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

$$x_2(n+1) = (K_1x_1(n) + K_2x_7(n - ntau) - x_2(n)) \frac{\Delta t}{T_2} + x_2(n);$$

$$x_3(n+1) = (K_3x_2(n) + K_4x_5(n - ntau) - x_3(n)) \frac{\Delta t}{T_3} + x_3(n);$$

$$x_4(n+1) = mx_3(n+1);$$

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

$$x_6(n+1) = (K_3x_5(n) + K_4x_2(n - ntau) - x_6(n)) \frac{\Delta t}{T_6} + x_6(n);$$

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

$$x_8(n+1) = (K_1x_7(n) + K_2x_1(n - ntau) - x_8(n)) \frac{\Delta t}{T_8} + x_8(n);$$

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

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

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;

Θ – температура, на яку нагріється газ концентрації 1% SO_2 при повному окисленні;

S – концентрація сірчистого газу SO_2 на вході в апарат;

ε – ступінь контактування в шарі;

τ_0 – час запізнювання в об’єкті регулювання внутрішнього теплообмінника;

t – час;

m – коефіцієнт;

x_1 – температура газу на вході до контактного апарату;

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 ($ntau+1$) 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 (приrostи) при ступінчастій зміні концентрації S газу на вході на 1 % (номінальною концентрацією є 7 – 7,5 %). По осі абсцис відкладений час в хвилинах.

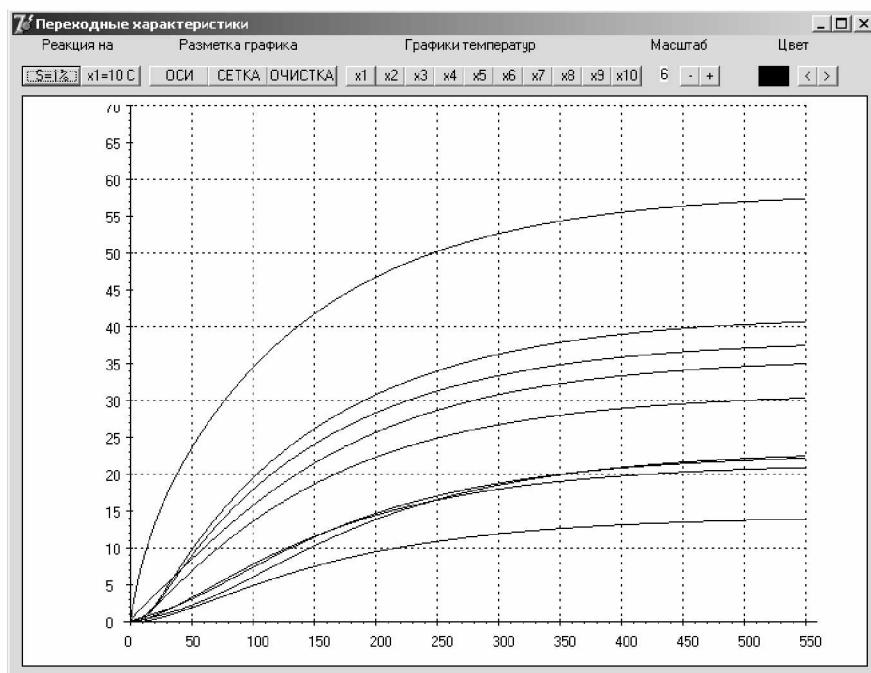


Рис. 1 – Реакції температур (приrostи) при ступінчастій зміні концентрації S газу на вході на 1%

Як бачимо, максимальне відхилення температури складає майже 60 °C. 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 °C (рис. 2).

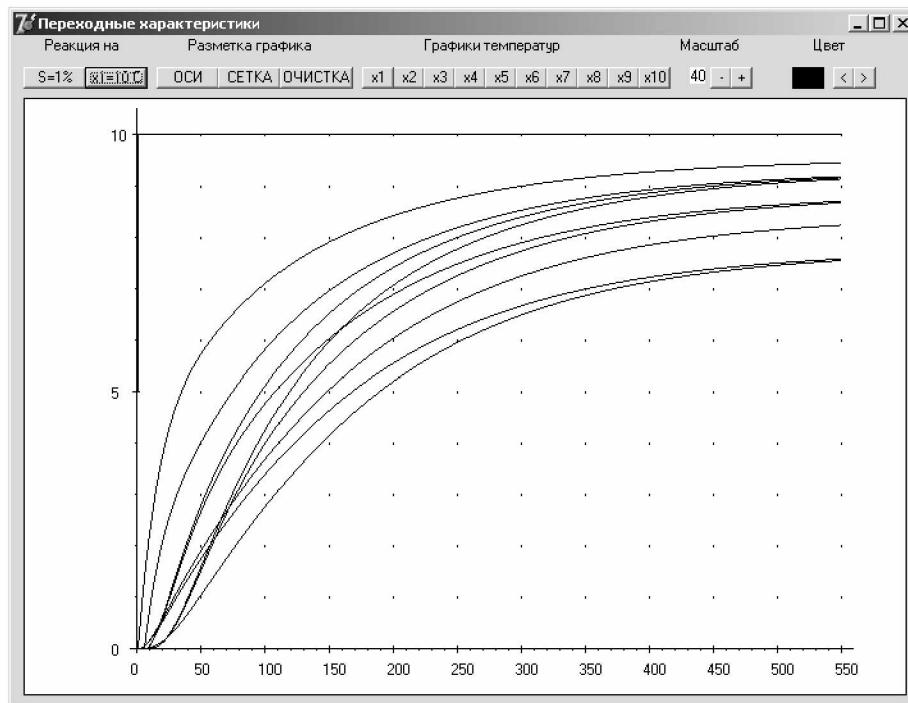


Рис. 2 – Реакції температур (приrostи) при ступінчастій зміні температури x_1 газу на вході на 1%

Як бачимо, максимальне відхилення, складає близько 9 °С. Це може привести 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 %.

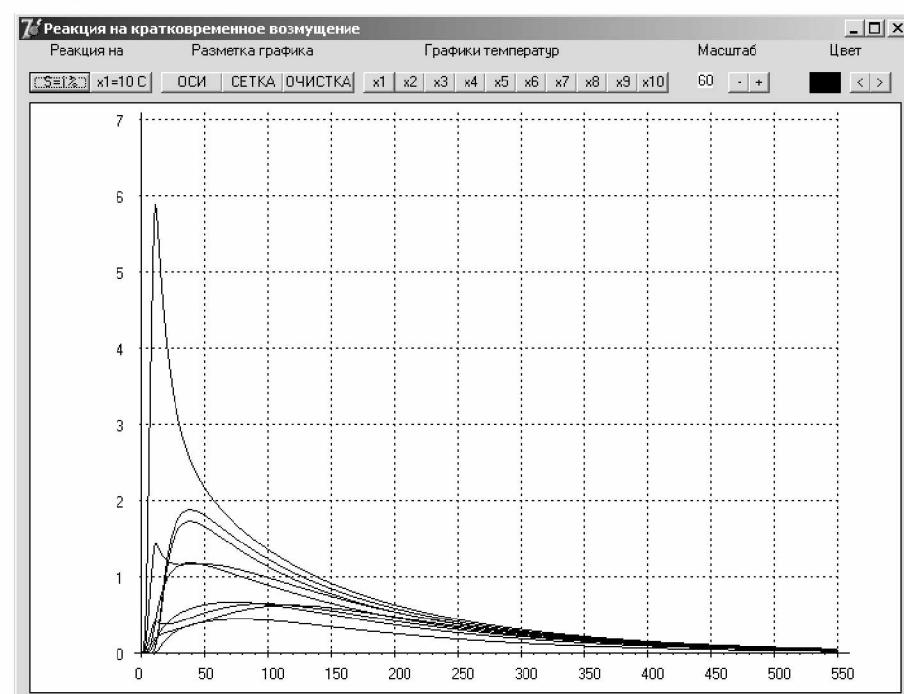


Рис. 3 – Реакція на короткотривале збурення концентрації газу S

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

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

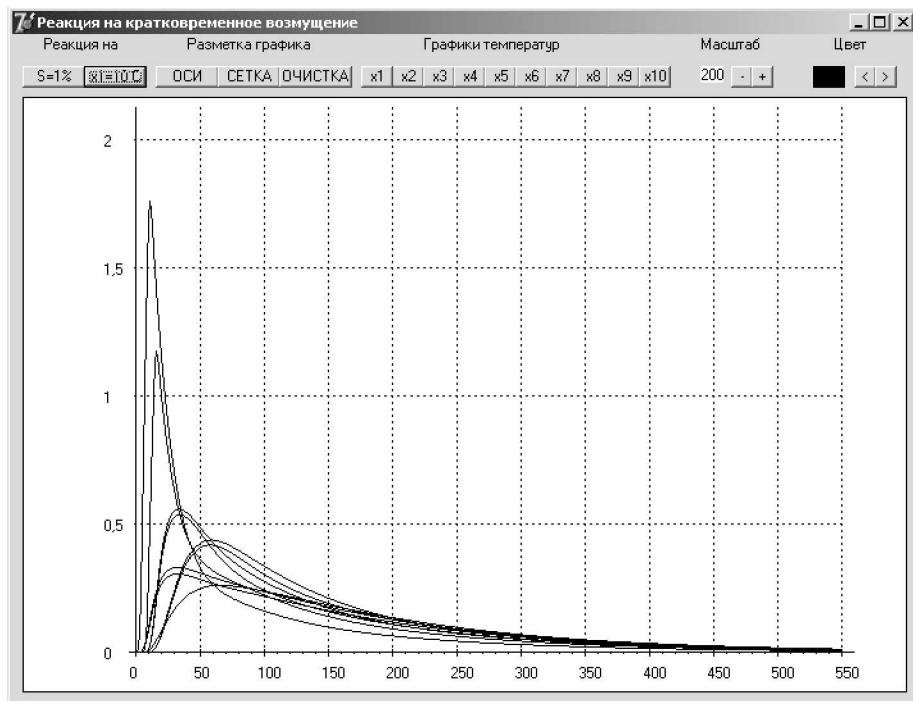


Рис. 4 – Реакція на короткотривале збурення температури газу x_1

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 °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 °C (бо реакція може припинитись). Температура газу на виході з будь-якого шару каталізатора не повинна перевищувати 650 °C (це може привести 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 швидкодією. 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 $\pm 1 \%$.

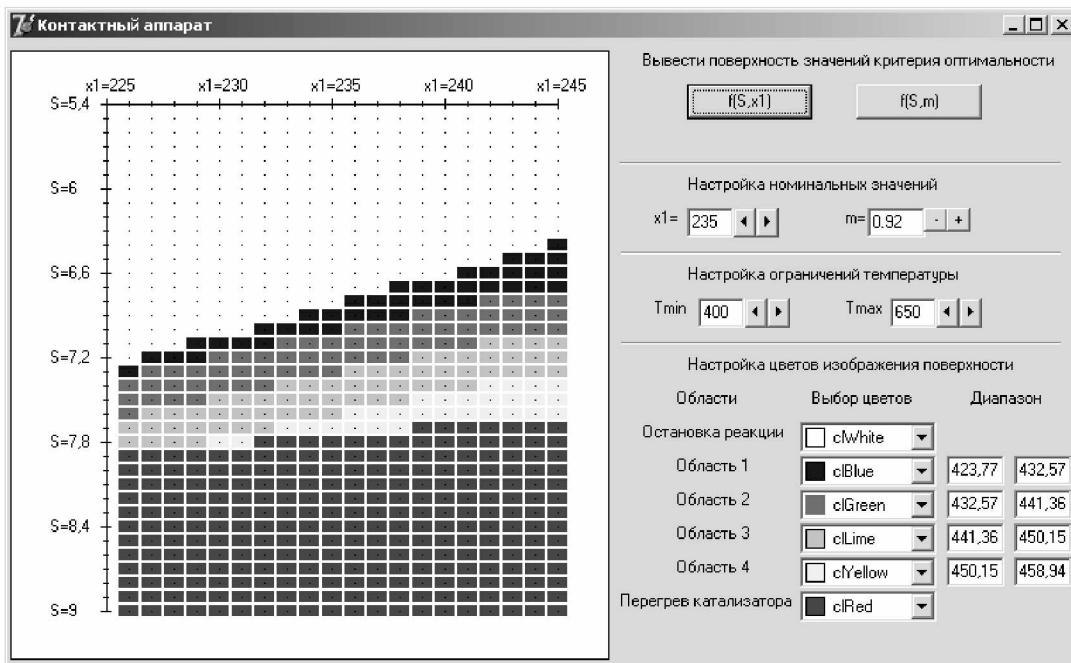


Рис. 5 – Зображення поверхонь рівня середньої температури $f(S, x_1)$

3. Бажаними (близькими до оптимальних) є завдання температури і концентрації в межах другої області (рис. 5). Залежність між оптимальною температурою і концентрацією входного 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:

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

Надійшла до редакції 21.05.2018

Mylenkyi V. V., Zan O. V., Dolyniuk B. S.

USE OF SIMULATION MODELS FOR OPTIMIZATION OF THE CONTACT APPARATUS WORK IN THE SULFURIC ACID PRODUCTION

In the modern world, in connection with the rapid development of computer technology and software widely used A far of processes in chemical industry is continuous and a production lasts twenty-four-hour. The stop of such processes results in considerable economic losses. Realization of active experiment on a production is complicated (through the necessity of stop of productive process and risk of damage of industrial equipment a researcher). Realization of passive experiment often does not give to the researcher of sufficient information about the looked after object (through the very small rejections of entrance signals of object and impossibility of influence a researcher on every entrance signal separately). An attractive alternative in this case is creation of simulation model.

The aim of the article is a publication of results of the use of simulation models for optimization of work of pin vehicle in the production of sulphuric acid.

Creation of simulation model settles many problems. There is possibility to set any values of entrance signals independent of each other. There is possibility to design emergency situations. In the modern world, transients in chemical industry last during many hours. By means of computer simulation models information about a transient it

is possible to get almost instantly (depending on the amount of calculations and power of the computing engineering).

Of long duration continuous process the process of pin oxidization can exemplify in the production of sulphuric acid. Oxidization of sulphureous anhydride SO_2 in sulfuric SO_3 takes place in pin vehicles at the presence of vanadium catalyst. Into a vehicle there are four layers of pin mass. Pin mass is placed on grates. One of basic indexes of quality of work of pin vehicles there is a degree of contact x_p , which is calculated on a formula.

As evidently from the results of design, the identical values of middle temperatures (levels) are situated along direct. This surface can be used for development of the system of automatic control. Will set the problem to support such temperature condition at which a middle temperature would be in the second area (green area). Thus a management would be near to optimal and there would not be a risk of stop of reaction in case of sudden hit in the area of stop of reaction (white area).

*On the real object the system of automatic control supports the stationary temperatures of gas on an entrance to every layer of pin mass (catalyst). As a rule gas temperatures on entrances to every layer lie within the limits of 420-450 °C. A maximal temperature on an exit from the layer of catalyst folds close 600 °C. Decline of gas temperature to 400 °C and below given to the stop of reaction (and it is impermissible in a continuous production). Transients in a pin vehicle last a few hours. The new start of process stipulates the considerable losses of time (*id est* is a loss). Increase of temperature to 650 °C and higher results in the overheat of catalyst to his spoilage. In this case it is necessary to stop a process and replace a catalyst (and these are very considerable material charges). Realization of active experiment is simply impermissible clearly, that. A simulation model enables how pleasingly to influence on a temperature condition into a pin vehicle. There is possibility to investigate temperature conditions near to the emergency (at a temperature on an entrance to one of layers of catalyst close or to the temperature on an exit from one of layers of catalyst close 650 °C).*

For creation of simulation model it is necessary foremost to formalize an object. For the mathematical design of behavior of object (dynamics and statics) it comfortably to use the system of differential equalizations. Differential equalizations can be got analytically from material balances. It is also possible to get differential equalizations after treatment of results of passive or active experiment.

On results the conducted imitation design it is possible to do next conclusions:

*1. An object is almost not sensible to short-term indignations. *Id est* there is not a necessity to design the system of automatic control with a high fast-acting. Recommended to steel of time for control system by a concentration and gas temperature approximately equal to 10 minutes.*

2. Most dangerous for the process of pin oxidization is an increase of concentration of SO_2 . A nominal concentration is 7,4 %. At the increase of concentration gas must be diluted by air (for normalization of concentration). At development of the system of automatic control it follows to take into account next limitations: maximal static rejection of concentration $\pm 0,1\%$; maximal dynamic (short-term) rejection of concentration $\pm 1\%$.

3. Desirable (near to optimal) are tasks of temperature and concentrations within the limits of the second area. Dependence between an optimal temperature and concentration entrance.

Keywords: simulation model, sulphuric acid, transition process, perturbation, concentration, temperature.

References:

1. Boreskov G.K. Catalysis in the production of sulfuric acid. M. - L. Goshimizdat, 1954, 348 p.
2. Amelin A.G. Sulfuric acid production. M. - Goshimizdat, 1956, p. 184-235, 407-412.
3. Fialko G. M. Automation of sulfuric acid production. M. - "Mechanical Engineering", 1964, p. 335 - 349.