

7. [Электронный ресурс] Режим доступа:  
[http://tourlib.net/books\\_tourism/lazarenko03.htm](http://tourlib.net/books_tourism/lazarenko03.htm)
8. Киргинцев А.Н. Растворимость неорганических веществ в воде. Справочник / А.Н. Киргинцев, Л.Н. Трушникова, В.Г. Лаврентьева. – Л.: Химия, 1972. – 248 с.
9. Алексеев В.И. Разработка рекомендаций на реконструкцию выпарной установки сульфата натрия в ОАО «Кучуксульфат». Этап 1. Анализ работы существующей выпарной установки. / Отчет о НИР. Фонд ГУ «НИОХИМ» – Харьков, 2012. – 36 с.
10. Большая Энциклопедия Нефти и Газа
11. Кашкаров О.Д. Технология калийных удобрений./ О.Д. Кашкаров, И.Д. Соколов – Л.: Химия, 1978. – 248 с.
12. Производство кальцинированной соды. Под редакцией М.Б. Зеликина – М.: Госхимиздат, 1959. – 421 с.

УДК 681.511.4:661.333(075)

*А.О. Бобух, канд. техн. наук; М.О. Подустов, докт. техн. наук;  
Переверзева А.М. (НТУ «ХП»); А.А. Барановський (ДУ «НИОХИМ»)*

### **АЛГОРИТМ ОПТИМІЗАЦІЇ ФУНКЦІОНУВАННЯ ОБ'ЄКТА ОБОРОТНОГО ВОДОПОСТАЧАННЯ ТА ВОДОСПОЖИВАННЯ ВИРОБНИЦТВА КАЛЬЦИНОВАНОЇ СОДИ**

*В статті розглянуті допоміжний об'єкт водопостачання та водоспоживання виробництва кальцированої соди за аміачним способом і розроблений алгоритм оптимізації функціонування та зниження енергетичних витрат основними об'єктами виробництва кальцированої соди.*

*В статье рассмотрены вспомогательный объект водоснабжения и водопотребления производства кальцинированной соды по аммиачному способу и разработанный алгоритм оптимизации функционирования этого объекта для повышения эффективности функционирования и снижения энергетических затрат основными объектами производства кальцинированной соды.*

*Auxiliary object of water supply and water consumption of soda ash production on an ammoniac way and the developed optimization algorithm of this object functioning for increase of functioning efficiency and decrease in power expenses by the main objects of soda ash production are considered in the article.*

Ключові слова: алгоритм, допоміжний об'єкт водопостачання та водоспоживання, виробництво кальцированої соди.

Keywords: algorithm, object of water supply and water consumption, production of soda ash.

#### **Вступ**

Виробництво кальцированої соди за аміачним способом (ВКС) відноситься до складних неперервних хіміко-технологічних процесів із декількома замкненими циклами за матеріальними потоками [1–3]. Детальний аналіз ВКС дозволив зробити висновок про необхідність та доцільність декомпозиції задач керування цим виробництвом на задачі керування основними та допоміжними об'єктами, як задачами меншого розміру. Серед допоміжних об'єктів на увагу заслуговує об'єкт оборотного водопостачання та водоспоживання, оскільки на нормальне функціонування ВКС серед інших енергоресурсів (електроенергія,

кокс, пара) потрібно  $150 \text{ м}^3$  технічної води на отримання 1 т кальцинованої соди [1].

Виконані дослідження стали основою одержання математичних залежностей для розробки чотирьох критеріїв допоміжного об'єкта водопостачання та водоспоживання (ОВП та ВС) ВКС [4], які необхідні для визначення:

збитків, що наносяться ВКС за рахунок неефективного функціонування допоміжного об'єкта оборотного водопостачання та водоспоживання;

збитків за рахунок суттєвих обмежень на відвід теплоти від екзотермічних реакцій на основних об'єктах;

збитків, що наносяться основним об'єктам ВКС в критичних місцях, які доцільно виділяти в окремі цикли  $j$ , де  $j = \overline{1, N}$ ;

збитків за рахунок неефективного відводу теплоти від основних об'єктів в  $j$ -му циклі.

Розроблені чотири критерії сприяли визначенню узагальненого критерію підвищення ефективності функціонування допоміжного об'єкта ОВП та ВС. Для реалізації цього критерію необхідно розробити алгоритм оптимізації функціонування допоміжного об'єкта ОВП та ВС для підвищення ефективності функціонування та зниження енергетичних затрат основними об'єктами ВКС.

### Мета роботи

Розробити алгоритм оптимізації функціонування допоміжного об'єкта оборотного водопостачання та водоспоживання для підвищення ефективності функціонування та зниження енергетичних витрат основними об'єктами виробництва кальцинованої соди за аміачним способом.

### Основна частина

В результаті проведених досліджень допоміжного об'єкта ОВП та ВС було визначено, що він входить як самостійний об'єкт керування в верхній рівень керування ВКС, в той саме час допоміжний об'єкт ОВП та ВС має дворівневу структуру керування.

Верхній рівень об'єкту ОВП та ВС передбачає керування підсистемами оборотного водопостачання та обмеженнями для забезпечення нормального функціонування основних технологічних об'єктів ВКС. На цьому рівні визначаються тільки ті збурюючі впливи, які, як за своєю абсолютною величиною, так і за силою впливу на основні об'єкти керування, визивають суттєві коливання на їх виходах.

Нижній рівень об'єкту ОВП та ВС передбачає керування своїми об'єктами та обмеженнями, такими об'єктами можуть бути будови: градирні, насосні станції тощо.

Визначений узагальнений критерій ( $K$ ) підвищення ефективності функціонування допоміжного об'єкту ОВП та ВС має вигляд:

$$K = (S_{Oч} + S_{ПТ})F_{ОВП} - \sum_{j=1}^N D_j F_j, \quad (1)$$

де  $S_{Oч}$  – вартість повної очистки одиниці оборотної води в результаті операції продувки;  $S_{ПТ}$  – вартість витрат на перекачку по трубопроводах та відведення теплоти, що виділяється в процесі хімічних реакцій, допоміжним об'єктом ОВП та ВС одиниці об'єму води;  $F_{ОВП}$  – реальні витрати холодної води на допоміжний об'єкт ОВП та ВС;  $D_j$  – сумарні збитки, що наносяться основними об'єктами в результаті вилучення  $j$ -ї складової із загальних витрат води на

операцію продувки;  $F_j$  – доля  $j$ -ї складової в загальних витратах води на операцію продувки.

Незважаючи на те, що взаємозв'язок поміж підсистемами допоміжного об'єкта ОВП та ВС ВКС дуже великий, вони умовно розділені на основні режими функціонування: водний і тепловий режими та сольовий баланс.

Визначимо умови оптимізації функціонування наведених режимів.

#### **Підсистема водного режиму допоміжного об'єкту ОВП та ВС**

Витрати ( $F$ ) води із підсистеми водного режиму допоміжного об'єкту ОВП та ВС на випарювання, винос та скидання (продувку) називаються параметрами водного режиму та визначаються за формулою:

$$F = F_1 + F_2 + F_3 + \sum_{i=1}^N F_{ii}, \quad (2)$$

де  $F_1, F_2$  – витрати води відповідно на випарювання та винос;  $F_3$  – витрати води на продувку;  $F_{ii}$  – безповоротні витрати води на технологічні потреби  $i$ -ї ділянки виробництва.

Витрати води на випарювання ( $F_1$ ) при її охолодженні визначаються за формулою:

$$F_1 = g_1 \Delta t F_0, \quad (3)$$

де  $g_1$  – коефіцієнт, який ураховує витрати води на випарювання в залежності від температури зовнішнього повітря;  $\Delta t$  – температурний перепад охолодження води, який обчислюється за різницею температур води на вході в градирню та охолодженої води;  $F_0$  – витрати води, яку відводять від ВКС та подають на усі теплообмінники на охолодження.

Витрати води на винос ( $F_2$ ) у вигляді капель, які викидаються вентилятором, визначають за формулою:

$$F_2 = g_2 F_0, \quad (4)$$

де  $g_2$  – коефіцієнт, який ураховує витрати води на винос у вигляді капель.

Витрати води на продувку ( $F_3$ ) при заданих характеристиках якості води (температура, концентрація солі) обчислюється та встановлюється в процесі оптимізації температурного режиму функціонування об'єкту ОВП та ВС.

Алгоритм оптимізації функціонування підсистеми водного режиму не складний. На практиці порушення цього режиму приведе до витрат ( $F$ ) води із допоміжного об'єкту ОВП та ВС, які в автоматичному режимі відновлюються свіжою технічною водою.

#### **Підсистема теплового режиму допоміжного об'єкту ОВП та ВС**

Для оптимізації підсистеми теплового режиму допоміжного об'єкту ОВП та ВС необхідно одночасно [5] розглядати основні об'єкти та допоміжний об'єкт оборотного водопостачання та водоспоживання ВКС.

Із рівняння теплового балансу визначаємо необхідні витрати ( $F_i$ ) води через  $i$ -й теплообмінник :

$$F_i = \frac{Q_i}{C}, \quad i = \overline{1, n}, \quad (5)$$

де  $Q_i$  – теплове навантаження  $i$ -го теплообмінника;  $C$  – питома теплоємність води;  $n$  – кількість теплообмінників.

Потім обчислюємо коефіцієнт теплопередачі ( $g_i$ ) при розрахованих

витратах води за формулою (5) та відомих фізико-хімічних властивостях продукту.

За рівнянням Грасгофа [6] визначаємо площу поверхні теплообмінника ( $G_i$ ), з якої відводять тепло у вигляді:

$$G_i = \frac{Q_i}{g_i \Delta t} = \frac{Q_i \ln \left[ \frac{t_{zi}}{t_{xi}} \right]}{g_i [t_{zi} - t_{xi}]}, \quad (6)$$

де  $\Delta t$  – середньо логарифмічна корисна різниця температур теплообмінників;  $t_{zi}, t_{xi}$  – температура  $i$ -го матеріального потоку відповідно гарячого та охолодженого. Інші параметри такі ж, як у формулі (5).

Після розрахунку за формулою (6) для усіх теплообмінників отримуємо основні параметри об'єкта ОВП та ВС: витрату води ( $F_0$ ) при роботі усіх теплообмінників; температуру води на їх входах  $t_x$  – холодної та виходах  $t_z$  – гарячої.

Визначення цих параметрів запишемо у вигляді:

$$F_0 = \sum_{i=1}^n F_{ti}; \quad (7.1)$$

$$t_x = t_{xi}; \quad (7.2)$$

$$t_z = \frac{\sum_{i=1}^n F_i t_{zi}}{\sum_{i=1}^n F_i} = t_x + \frac{\sum_{i=1}^n F_i}{CF_0}. \quad (7.3)$$

Розглянемо систему теплопередачі в теплообмінниках та їх теплового балансу при зміні робочих режимів теплообмінників у вигляді:

$$\begin{cases} Q_i = g_i F_i G_i \frac{(t_{zi} - t_{xi})}{\ln \frac{t_{zi}}{t_{xi}}}, \\ Q_i = CF_i (t_{zi} - t_{xi}); i = \overline{1, n}. \end{cases} \quad (8)$$

Невідомими в отриманій системі є величини:  $t_{xi}, t_{zi}, F_i$ . Для їх визначення введемо рівняння зв'язку вигляду (9) та назвемо його робочою характеристикою теплообмінника ( $W_i$ ) об'єкту ОВП та ВС:

$$W_i(Q, t_{xi}, t_{zi}, F_0) = 0, \quad (9)$$

при якій теплообмінник забезпечує задане охолодження матеріального потоку.

Підставимо в рівняння теплопередачі системи (8) перепад температур, який запишемо через тепловий баланс теплообмінника [5] у вигляді:

$$Q_i \ln \frac{t_{zi}}{t_{xi}} = g_i F_i G_i (t_{zi} - t_{xi}) - \frac{Q_i}{CF_i}. \quad (10)$$

Для формули (10) введемо позначення (11), після чого визначимо:

$$A_i = \frac{g_i F_i G_i (t_{zi} - t_{xi}) - \frac{Q_i}{CF_i}}{Q_i}, \quad (11)$$

$$t_{zi} = t_{zi} - (t_{xi} - \frac{Q_i}{CF_i}) = t_{zi} \exp A_i - t_{xi} \exp A_i. \quad (12)$$

За формулою (12) визначаємо  $t_{xi}$  та  $t_{zi}$  :

$$t_{xi} = \frac{t_{zi} \exp A_i - t_{zi} + \frac{Q_i}{CF_i}}{\exp A_i - 1}, \quad (13.1)$$

$$t_{zi} = t_{xi} + \frac{Q_i}{CF_i}. \quad (13.2)$$

Після розрахунку робочої характеристики теплообмінників ( $W_i$ ) визначимо закономірності охолодження води атмосферним повітрям.

Головними факторами, які визначають ефект охолодження води випаровуванням, є: витрати повітря ( $J$ ), яке бере участь в теплообміні, та його ентальпія ( $H$ ).

Зв'язок ентальпії з первинними метеорологічними факторами визначається [7] залежністю:

$$H = \frac{t_n + (1550 + 1,22t_n)\varphi P_n(t_n)}{P_0 - \varphi P_n(t_n)}, \quad (14)$$

де  $t_n$  – температура повітря;  $\varphi$  – відносна вологість повітря, ( $0 < \varphi < 1$ );  $P_0, P_n$  – тиск відповідно барометричний та насиченої пари.

Аналогічно, як за формулою (9), запишемо робочу характеристику споруд охолодження води ( $W_{охолод}$ ) допоміжного об'єкту ОВП та ВС у вигляді:

$$W_{охолод}(Q, t_x, t_{zi}, F_0, J, H) = 0. \quad (15)$$

Для допоміжного об'єкту ОВП та ВС запишемо рівняння тепло- та масообміну в закритій споруді охолодження [5 – 7] у вигляді:

$$\frac{\alpha\beta(F_0, J)V}{CF_0} = \int_{t_x}^{t_z} \frac{dt}{H_n(t) - H - \frac{(t_{zi} - t_{xi})CF_0}{\alpha J}}, \quad (16)$$

де  $\alpha$  – поправочний коефіцієнт;  $\beta$  – об'ємний коефіцієнт масовіддачі;  $V$  – об'єм споруди охолодження;  $H_n$  – ентальпія насиченої пари.

Для визначення математичної моделі підсистеми теплового режиму допоміжного об'єкту ОВП та ВС ( $\psi_{ОВП}$ ) спочатку знайдені робочі характеристики за формулами: (9) для теплообмінників та (15) для споруд охолодження води поєднаємо у вигляді:

$$\left. \begin{aligned} W_i(Q, t_{xi}, t_{zi}, F_0) &= 0, \\ W_{охолод}(Q, t_x, t_{zi}, F_0, J, H) &= 0 \end{aligned} \right\} \psi_{ОВП}(Q, F_0, J, H) = 0. \quad (17)$$

Після цього з урахуванням формул (16) і (17), виконавши операцію підставлення в границі інтегрування значень  $t_{xi}$  із формул (7.2) і (13.1), а  $t_{zi}$  із формул (7.3) і (13.2), отримаємо математичну модель підсистеми теплового режиму допоміжного об'єкту ОВП та ВС у вигляді:

$$\psi_{ОВП}(Q, F_0, J, H) = \frac{\alpha\beta(F_0, J)V}{CF_0} = \int_{t_{xi}}^{t_{zi}} \frac{dt}{H_n(t) - H - \frac{[t_{zi} - t_{xi}(Q, F_0)]CF_0}{\alpha J}}. \quad (18)$$

Таким чином, розроблена математична модель підсистеми теплового

режиму (18) представляє собою структурну та параметричну оптимізацію підсистеми теплового режиму допоміжного об'єкту ОВП та ВС.

### **Підсистема сольового балансу допоміжного об'єкту ОВП та ВС**

У зв'язку з тим, що в ВКС відбирається дуже багато води на технологічні потреби, а цей відбір автоматично повністю компенсує витрати води на продувку, алгоритм оптимізації підсистеми сольового балансу об'єкту ОВП та ВС не має сенсу,

Аналіз розглянутих трьох підсистем допоміжного об'єкту ОВП та ВС ВКС надає можливість стверджувати, що підсистема теплового балансу є основною допоміжного об'єкту ОВП та ВС, а тому алгоритм її структурної та параметричної оптимізації може бути алгоритмом оптимізації функціонування допоміжного об'єкту ОВП та ВС для підвищення ефективності функціонування та зниження енергетичних витрат основними об'єктами ВКС.

Розроблені математичні залежності (1–18) відносно просто можуть бути реалізовані при розробці комп'ютерно-інтегрованих допоміжних, зокрема оборотного водопостачання та водоспоживання, та основних об'єктів ВКС за допомогою сучасних багатofункціональних, високопродуктивних та швидкодіючих мікропроцесорних контролерів із спеціальними програмними забезпеченнями, а також – контрольно-вимірювальних приладів та засобів автоматизації [8].

### **Висновок**

В результаті досліджень розроблено алгоритм оптимізації функціонування допоміжного об'єкту ОВП та ВС для підвищення ефективності функціонування та зниження енергетичних витрат основними об'єктами ВКС. Використання розробленого алгоритму при розробці та впровадженні комп'ютерно-інтегрованого ВКС буде сприяти ефективному управлінню ним та підвищенню його енергозбереження.

### **Література**

1. Зайцев И. Д. Производство соды / И. Д. Зайцев, Г. А. Ткач, Н. Д. Стоев. – М.: Химия. 1984. – 312 с.
2. Процессы и аппараты химической технологии: учебник для вузов в 2 ч. Ч. 1 / Л. Л. Тovaжнянский, А. П. Готлинская, В. А. Лещенко и др.; под общей ред. Л. Л. Тovaжнянского. Х.: НТУ «ХПИ». 2004. – 632с.
3. Процессы и аппараты химической технологии: учебник для вузов в 2 ч. Ч. 2 / Л. Л. Тovaжнянский, А.П.Готлинская, В.А.Лещенко и др.; под общей ред. Л. Л. Тovaжнянского. – Х.: НТУ «ХПИ». 2005. – 523с.
4. Бобух А. А. Моделирование объекта оборотного водоснабжения производства кальцинированной соды / А.А.Бобух, А.М.Дзевочко, М. А. Подустов // Общегосударственный научно-производственный и информационный журнал «Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит». – Х.: Издається при підтримці Академії наук Вищого образования України. 2015. № 10 (141). – С. 2–9.
5. Гордин И. В. Технологические системы водообработки. Динамическая оптимизация. / И. В. Гордин. – Л.: Химия. 1987. – 264 с.
6. Таубман Е. И. Контактные теплообменники / Е. И. Таубман, В.А. Гордеев и др. – М.: Химия. 1987. – 256 с.
7. Гладков В. А. Вентиляторные градирни / В. А. Гладков, Ю. И. Арефьев, В. С. Пономаренко. – М.: Стройиздат. 1976. – 216 с.
8. Сиротский А. А. Микропроцессорные программируемые логические контроллеры в системах автоматизации и управления / Учеб. пособие для вузов // А. А. Сиротский. – М.: Спутник, 2013. – 170 с.