

Вакуум-апарати з циркуляторами: шлях до підвищення енергоефективності цукрового виробництва

*С.М. Василенко, доктор технічних наук, професор, Національний університет харчових технологій, НТУУ «КПІ»
М.О. Прядко, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри теплоенергетики та холодильної техніки, Національний університет харчових технологій
С.М. Самійленко, Національний університет харчових технологій
А.В. Форсюк, кандидат технічних наук, доцент, Національний університет харчових технологій
В.М. Кухар, генеральний директор ТОВ «Фірма ТМА»
П.І. Лисюк, ТОВ «Фірма ТМА»*

Сучасний цукровий завод являє собою єдиний теплотехнологічний комплекс, що включає елементи технологічного, теплообмінного, механічного обладнання, пов'язані між собою складною схемою різнорідних зв'язків, та в якому одночасно протікають, тісно взаємодіючи, складні фізико-хімічні процеси. Саме ця складність внутрішніх взаємозв'язків процесів, їх параметрів та характеристик визначає необхідність системного підходу до аналізу реального функціонування теплотехнологічного комплексу та оцінки його ефективності. Відповідно, постає також принципова необхідність системного підходу до розв'язання задачі оптимізації теплотехнологічного комплексу цукрового заводу.

Під час реконструкції теплотехнологічних комплексів цукрових заводів необхідно застосувати основні принципи, які б враховували необхідність отримання інтегрованого проектного рішення, що було б не лише енергетично оптимальним, але й технічно прийнятним. Оскільки, внаслідок складності, процедура проектування вимагає застосування методів системного аналізу, комплекс заходів з оптимізації тепловикористання, в першу чергу, слід вибудувати у відповідну ієрархію заходів, пов'язаних з вибором **оптимальної структури та окремих елементів системи**.

Оптимізація вимагає комплексного аналізу наступних задач: 1- задачі синтезу та оцінки альтернативних структур теплотехнологічних схем; 2- задачі вибору апаратів та параметрів схеми в рамках кожної синтезованої структури. **При цьому слід враховувати досвід, який засвідчує, що ефект від оптимізації структури теплотехнологічного комплексу на порядок вищий від ефекту оптимальної організації окремих елементів структури чи оптимального управління процесом.**

Тобто, при оптимізаційному виборі нових елементів обладнання чи способів модернізації існуючих перш за все слід виконувати вимоги синтезу оптимальної структури теплотехнологічного комплексу та результатів його математичного моделювання. В свою чергу, при синтезі оптимальної структури теплотехнологічного комплексу слід враховувати технічні можливості обладнання

та експлуатаційні вимоги, в т.ч. вимоги контролю та управління, компоновку та комунікації підприємства, вимоги безпеки, контроль забруднення навколишнього середовища тощо.

В спрощеному вигляді заходи з оптимізації структури теплотехнологічного комплексу можна звести до наступних дій:

- зменшення витрати пари на окремі споживачі;
- максимальне використання вторинних енергоресурсів;

- збільшення кратності випаровування випарної установки з метою компенсації зменшення паровідборів (Для випарних установок цукрових заводів України кратність випаровування має значення в межах 2-2,4, в той час як на кращих європейських цукрових заводах випарні установки досягають кратності випаровування на рівні 3,7 – 4,0. Підвищення кратності випаровування досягається за рахунок збільшення числа ступенів випаровування та перенесення паровідборів на останні ступені випаровування).

- дотримання балансу споживання і виробництва теплової та електричної енергій.

Саме виконання цих заходів повинне лягти в основу парку тепломасообмінної апаратури, що забезпечувала б реалізацію оптимальних схем теплотехнологічних комплексів цукрових заводів.

Оскільки найбільшим споживачем пари в цукровому заводі є кристалізаційне відділення, головним методом реалізації попередньо сформульованих заходів має бути застосування **вакуум-апаратів з циркуляторами**:

1. Вакуум-апарати цього типу дозволяють уварювати густі сиропи із вмістом СР=72-74% (при існуючих 63-65% для вакуум-апаратів з природною циркуляцією), що зменшує витрату пари на вакуум-апарати.

2. Вакуум-апарати цього типу дозволяють проводити процес уварювання при понижених температурних напорах, що дозволяє **збільшити кратність випаровування випарної установки** за рахунок використання нагрівної пари більш низького потенціалу.

Впровадження вакуум-апаратів з циркуляторами дозволяє отримати значне зниження витрати пари на виробництво без значних додаткових ка-

пітальних вкладень.

Визначимо можливе зменшення витрати пари в бурякоцукровому виробництві при впровадженні вакуум-апаратів з циркуляторами як апаратів першого продукту, причому при цьому аналізі враховуватимемо виключно фактори, що впливають з балансу випарної установки.

В основу аналізу покладемо рівняння матеріального та теплового балансів випарної установки в наближенні Классена.

З балансу сухих речовин кількість води, випареної у випарній установці та вакуум-апаратах першого продукту із соку, що надходить у випарну установку,

$$\sum W = S_{\text{ву}} (1 - \text{CB}_{\text{ву}} / \text{CB}_{\text{ут1}}) \quad (1)$$

Одночасно, ця кількість води з балансу випарної установки та кристалізаційного відділення (в наближенні Классена)

$$\sum W = \sum i \cdot E_i + j \cdot W_{\text{ва1}} + k \cdot W_{\text{ва2}} + n \cdot W_{\text{ва3}} + W_{\text{ва1}}', \quad (2)$$

де E_i – загальний паровідбір з i -го корпусу випарної установки крім відбору пари на кристалізаційне відділення (традиційно корпусом називаємо ступінь випаровування випарної установки); $W_{\text{ва1}}$, $W_{\text{ва2}}$, $W_{\text{ва3}}$ – кількість води, випареної відповідно в вакуум-апаратах першого, другого і третього продуктів; $W_{\text{ва1}}' = S_{\text{ву}} \text{CB}_{\text{ву}} (1 / \text{CB}_{\text{сир}} - 1 / \text{CB}_{\text{ут1}})$; j , k , n – номер корпусу, що обігріває відповідно вакуум-апарати першого, другого і третього продуктів.

1. Зменшення витрати пари на виробництво шляхом підвищення початкової вмісту сухих речовин в сиропі після ВУ. Це зменшення витрати пари стає можливим завдяки тому, що вакуум-апарати з циркуляторами дозволяють уварювати сиропи з початковою концентрацією сухих речовин до 72% ($\text{CB}_{\text{сир}} = 72\%$). Очікуване зниження витрати вторинної пари другого корпусу випарної установки (ВУ) на обігрівання вакуум-апаратів першого продукту при цьому, очевидно, залежатиме від значення початкової концентрації сухих речовин в сиропі після ВУ перед вакуум-апаратами, що мала місце до проведення реконструкції

$$\Delta D = W_{\text{ва1}} - W_{\text{ва.min1}} - D_k \quad (3)$$

де $W_{\text{ва1}} = 1,1(S_{\text{ву}} \text{CB}_{\text{ву}} (1 / \text{CB}_{\text{сир}} - 1 / \text{CB}_{\text{ут1}}) + S_{\text{кл}} (1 - \text{CB}_{\text{кл}} / \text{CB}_{\text{ут1}}) + S_{\text{бп}} (1 - \text{CB}_{\text{бп}} / \text{CB}_{\text{ут1}}))$ – кількість випареної у вакуум-апаратах першого продукту води до реконструкції;

$W_{\text{ва.min1}} = 1,1(S_{\text{ву}} \text{CB}_{\text{ву}} (1 / \text{CB}_{\text{сир.рек}} - 1 / \text{CB}_{\text{ут1}}) + S_{\text{кл.рек}} (1 - \text{CB}_{\text{кл.рек}} / \text{CB}_{\text{ут1}}) + S_{\text{бп.рек}} (1 - \text{CB}_{\text{бп.рек}} / \text{CB}_{\text{ут1}}))$ – кількість випареної у вакуум-апаратах першого продукту води після впровадження вакуум-апаратів з циркуляторами;

$D_k = 0,6(W_{\text{ва1}} - W_{\text{ва.min1}})$ – регулюючий вихід вторинної пари останнього корпусу ВУ на конденсатор для підтримання необхідного вмісту сухих речовин в сиропі після випарної установки;

$S_{\text{ву}} \text{CB}_{\text{ву}}$ – витрата соку та вміст в ньому сухих речовин перед ВУ; $\text{CB}_{\text{сир}}$, $\text{CB}_{\text{сир.рек}}$ – вміст сухих речовин в сиропі після ВУ до та після впровадження вакуум-апаратів з циркуляторами; $S_{\text{кл}}$, $S_{\text{кл.рек}}$ – ви-

трата клеровки до та після впровадження вакуум-апаратів з циркуляторами; $\text{CB}_{\text{кл}}$, $\text{CB}_{\text{кл.рек}}$ – вміст сухих речовин в клеровці після ВУ до та після впровадження вакуум-апаратів з циркуляторами; $\text{CB}_{\text{ут1}}$ – вміст сухих речовин в утфелі першого продукту; $S_{\text{бп}}$, $S_{\text{бп.рек}}$ – витрата білої патоки першого продукту на вакуум-апарати першого продукту; $\text{CB}_{\text{бп}}$, $\text{CB}_{\text{бп.рек}}$ – вміст сухих речовин в білій патоці першого продукту.

На **рис. 1 (ряд 1)** наведено залежність зменшення витрати пари на ВУ (шляхом зниження витрати пари на вакуум-апарати першого продукту) від значення початкової концентрації сухих речовин в сиропі перед вакуум-апаратами першого продукту, що мала місце до проведення реконструкції.

При цьому вміст сухих речовин в сиропі після ВУ на рівні 72% підтримується виключно виходом вторинної пари останнього корпусу ВУ на конденсатор (так зване «хвостове» регулювання), тобто теплова схема в цілому не модернізується.

2. Зменшення витрати пари на виробництво шляхом підвищення «кратності випаровування» випарної установки. Це зменшення витрати пари стає можливим завдяки тому, що вакуум-апарати з циркуляторами дозволяють уварювати сиропи при понижених значеннях температурних напорів, тобто парою нижчого потенціалу. Очікуване зниження витрати пари на обігрівання вакуум-апаратів першого продукту виключно за рахунок переведення з обігрівання вторинною парою другого корпусу ВУ на обігрівання вторинною парою третього корпусу ВУ (регулювання вмісту сухих речовин в сиропі після ВУ виходом вторинної пари останнього корпусу ВУ на конденсатор не здійснюється) при цьому складає

$$\Delta D = 0,25 W_{\text{ва1}} \quad (4)$$

На **рис. 1 (ряд 2)** наведено залежність зменшення витрати пари на ВУ від значення початкової концентрації сухих речовин в сиропі перед вакуум-апаратами першого продукту, що мала місце до проведення реконструкції, виключно за рахунок переведення з обігрівання вторинною парою другого корпусу ВУ на обігрівання вторинною парою третього корпусу.

3. Зменшення витрати пари на виробництво шляхом одночасного підвищення початкової концентрації сухих речовин в сиропі перед вакуум-апаратами першого продукту та «кратності випаровування» випарної установки. При цьому одночасно здійснюється переведення вакуум-апаратів першого продукту з обігрівання вторинною парою другого корпусу ВУ на обігрівання вторинною парою третього корпусу та підтримання максимально можливої початкової концентрації сухих речовин в сиропі перед вакуум-апаратами першого продукту (вміст сухих речовин в сиропі після ВУ на рівні 72% підтримується виключно виходом вторинної пари

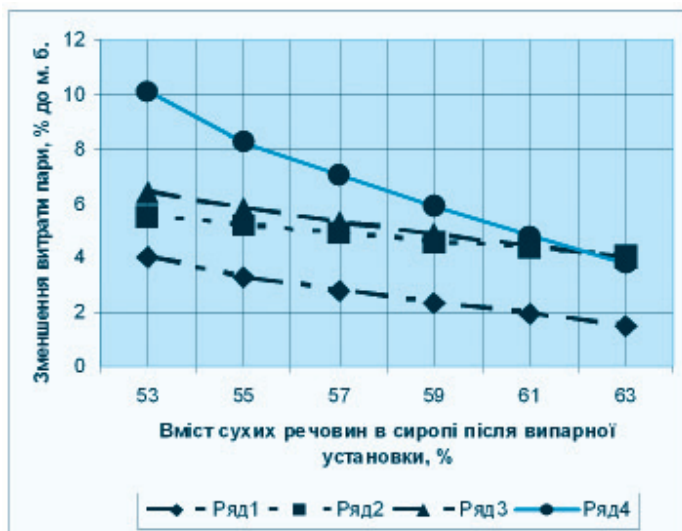


Рис. 1. Зменшення витрати пари при впровадженні вакуум-апаратів з циркуляторами

($S_{ву} = 125\%$ до м.б.; $CB_{ву} = 14\%$; $CB_{умл} = 93\%$; $S_{кл} = S_{кл.рек} = 15\%$ до м.б.; $CB_{кл} = CB_{кл.рек} = 65\%$; $CB_{суп.рек} = 72\%$; $S_{он} = 7,5\%$; $S_{он.рек} = 5\%$; $CB_{он} = CB_{он.рек} = 76\%$).

останнього корпусу ВУ на конденсатор). Очікуване зниження витрати пари на обігрівання вакуум-апаратів першого продукту при цьому визначиться згідно (1), де $D_k = (3 W_{вал} - 4 W_{ва.мін1})/5$.

На рис. 1 (ряд 3) наведено залежність зменшення витрати пари на ВУ при здійсненні викладених в цьому пункті заходів від значення початкової концентрації сухих речовин в сиропі перед вакуум-апаратами першого продукту, що мала місце до проведення реконструкції

4. На рис. 1 (ряд 4) також наведена лінія **максимально можливого зменшення витрати пари на вакуум-апарати першого продукту**, яке має місце в тому випадку, якщо вміст сухих речовин після ВУ на рівні 72% підтримується не виходом вторинної пари останнього корпусу ВУ на конденсатор, а впровадженням відповідних додаткових заходів з підвищення кратності випаровування ВУ.

Для цукрового заводу потужністю 3000 переробки буряків на добу з середніми по галузі показниками роботи зменшення витрати палива лише за рахунок заміни вакуум-апаратів першого продукту **добове зниження витрати паливно-енергетичних ресурсів може скласти близько 30 тонн умовного палива на добу.**

Для другого та третього продуктів заміна вакуум-апаратів з природною циркуляцією на апарати з циркуляторами дозволяє отримати зменшення витрати палива, очевидно, лише за рахунок підвищення кратності випаровування. Під час цього зменшення витрати пари складатиме

$$\Delta D = 1/3 \cdot W_{ва 2,3} \quad (5)$$

Тобто при переведенні вакуум-апаратів другого продукту на обігрівання вторинною парою третього корпусу – біля 0,9% до м.б.; вакуум-апаратів третього продукту – біля 0,3% до м.б.

Для порівняння, при заміні вакуум-апаратів першого продукту зменшення витрати пари скла-

де (якщо до реконструкції вміст сухих речовин в сиропі після випарної установки складав 59%): при впровадженні заходів за п.1 – 2,36%, за п.2 – 4,6%, за п.3 – 4,86%, за п.4 – 5,89%. Тобто, економія ПЕР при заміні вакуум-апаратів першого продукту в кілька разів перевищує економію, отриману внаслідок заміни вакуум-апаратів другого та третього продуктів.

Таким чином, при впровадженні вакуум-апаратів з циркуляторами перевагу слід надавати заміні вакуум-апаратів першого продукту.

Слід зауважити, що якщо до реконструкції вміст сухих речовин в сиропі після випарної установки складав 65%, то одночасне переведення вакуум-апаратів першого, другого та третього продуктів на обігрівання вторинною парою третього корпусу замість другого призведе до перевипарювання у випарній установці та отриманню сиропів після випарної установки із вмістом сухих речовин понад 73%. Тобто, одночасно необхідно впроваджувати інші заходи із зменшення витрати пари, що дозволить знизити кратність випаровування.

Слід відзначити, що вищенаведене розраховане зниження витрати пари викликане виключно заміною вакуум-апаратів з природною циркуляцією на вакуум-апарати з циркуляторами без жодних дій з реконструкції теплотехнологічного комплексу. Проведення ж додаткових заходів з модернізації теплотехнологічного комплексу, що стають можливими, в тому числі, завдяки впровадженню вакуум-апаратів з циркуляторами, дозволяє значно підвищити ефективність використання паливно-енергетичних ресурсів (ПЕР).

Крім цього, слід додатково врахувати вплив технологічних факторів, що супроводжують заміну вакуум-апаратів, на зменшення витрати ПЕР: зменшення величини підкачок під час уварювання та, як наслідок, додаткове зменшення кількості випареної води і, відповідно, нагрівної пари; зменшення часу уварювання та, як наслідок, зменшення втрат енергії в навколишнє середовище, тощо.

Зменшення кількості вторинної пари вакуум-апаратів (так званої «ульфельної» пари) також дозволяє знизити витрату оборотної води вакуум-конденсаторної установки та, відповідно, витрату електроенергії на привід насосів оборотної води.

В результаті багаторічних досліджень вчених та інженерів УкрНДЦП та ТОВ «Фірма ТМА» розроблені вітчизняні вакуум-апарати з циркуляторами, що виробляються Яготинським механічним заводом. Використання цих апаратів при модернізації теплотехнологічних комплексів ряду заводів України та Росії підтвердили високі показники їх роботи та відповідність вимогам оптимізації структури теплотехнологічного комплексу.

Висновки. Наведено методику та розрахунки очікуваного зменшення витрати пари з ТЕЦ в цукровий завод при впровадженні вакуум-апаратів з циркуляторами. ■