

# Ефективність використання теплоти вторинних енергоресурсів (ВЕР) в теплових схемах цукрових заводів

**М.О. Прядко**, доктор технічних наук, професор, кафедра теплоенергетики та холодильної техніки, Національний університет харчових технологій

**С.М. Василенко**, доктор технічних наук, професор, завідувач, кафедра теплоенергетики та холодильної техніки, Національний університет харчових технологій

**В.П. Петренко**, кандидат технічних наук, доцент, кафедра теплоенергетики та холодильної техніки, Національний університет харчових технологій

Проаналізовано основні джерела теплоти вторинних енергоресурсів в цукровому виробництві. Використання теплоти вторинних енергоресурсів є основним джерелом підвищення енергоефективності цукрового виробництва. Комплексний аналіз ефективності використання вторинних енергоресурсів є методологічною базою розроблення енергоефективних теплотехнологій цукрового виробництва.

Ключові слова: вторинні енергоресурси, паровідбір, кратність випаровування.

Проанализированы основные источники теплоты вторичных энергоресурсов в сахарном производстве. Использование теплоты вторичных энергоресурсов является основным источником повышения энергоэффективности сахарного производства. Комплексный анализ эффективности использования вторичных энергоресурсов является методологической базой разработки энергоэффективных теплотехнологий сахарного производства.

Ключевые слова: вторичные энергоресурсы, пароотбор, кратность испарения.

**Вступ.** До найбільш вагомих джерел ВЕР на цукровому заводі відносять:

1) Теплоту вторинної пари вакуум-апаратів, яку можна використати, залежно від схеми очистки соку, для нагрівання дифузійного соку або соку перед основною гарячою дефекацією до температури біля 55°C, за умови, якщо початкова температура соку не перевищує 50°C. Це дає можливість зменшити відбір вторинної пари з останнього, n-го, корпусу випарної установки (ВУ) на величину  $\Delta E_1^n$ .

2) Теплоту конденсатів відпрацьованої пари та вторинної пари після першого корпусу ВУ при умові, що температура цих конденсатів після конденсатної схеми перевищує 105°C (за умови їх охолодження до 100°C перед поверненням в ТЕЦ). Це дає можливість зменшити відбір вторинної пари з 2-го корпусу ВУ на величину  $\Delta E_2$ .

3) Теплоту конденсату з останнього збірника конденсатної схеми, що має температуру біля 85°C, який доцільно охолодити до 70°C перед використанням його як живильну воду для дифузійної установки, нагріваючи дифузійний сік або сік перед основною гарячою дефекацією. Таким чином можна зменшити відбір вторинної пари з останнього корпусу ВУ на величину  $\Delta E_3^n$ .

4) Використання конденсату з останнього збірника конденсатної схеми як живильну воду для дифузійної установки замість барометричної води. При цьому відпадає потреба в нагріванні барометричної води від 45°C до 65°C і зменшується відбір вторинної пари з останнього корпусу ВУ на величину  $\Delta E_4^n$ .

Результати та обговорення. Як відомо, витрата пари на ВУ дорівнює:

$$D_{BY} = \frac{W_{BY}^{необ}}{n} + \frac{n-1}{n} E_1 + \frac{n-2}{n} E_2 + \dots + \frac{1}{n} E_{n-1}, \quad (1)$$

$$\text{або: } D_{BY} = \sum E_i + D_k, \quad (2)$$

де:  $E_i$  - відбір вторинної пари з  $i$ -того корпусу ВУ,  $D_k$  - надходження вторинної пари з останнього корпусу ВУ чи з концентратора в барометричний конденсатор (БК), необхідна продуктивність ВУ

$$W_{BY}^{необ} = S_{ПВУ} \left( 1 - \frac{CP_{ПВУ}}{CP_{сир}} \right). \quad (3)$$

У той же час, в кожний момент роботи необхідна продуктивність ВУ,  $W_{BY}^{необ}$ , повинна дорівнювати фактичній,  $W_{BY}^{факт}$ , продуктивності. Остання забезпечується відборами вторинної пари з корпусів ВУ,  $E_i$ , та надходженням пари в БК,  $D_k$ , тобто:

$$W_{BY}^{факт} = W_{BY}^{необ} = \sum i \cdot E_i + [n \text{ або } (n+1)] D_k, \quad (4)$$

де:  $n$  – відноситься до ВУ без концентратора,  $(n+1)$  – відноситься до ВУ з концентратором.

Таким чином зменшення витрати пари на ВУ,  $D_{BV}$ , можна досягти:

а) зменшенням  $S_{ПВУ}$  за рахунок зменшення величини відкачки дифузійного соку,  $S_{відк}$ , витрати вапнякового молока та ліквідації надходження до соку додаткової води на верстаті заводу. З цим пов'язане збільшення концентрації соку, що надходить до ВУ, та зменшення  $W_{BV}^{необ}$ ;

б) зменшенням величин відборів вторинної пари з корпусів ВУ за рахунок зменшення кількості соку, що нагрівається, та використання теплоти ВЕР для нагрівання соку.

в) зменшенням теплових втрат на станціях заводу (охладження соку за рахунок теплових втрат на  $1^\circ\text{C}$  приводить до перевитрати палива на, приблизно,  $0,15 \text{ м}^3$  газу/тонну буряків).

Зменшення відборів вторинної пари за рахунок використання теплоти ВЕР пов'язане зі зменшенням фактичної продуктивності ВУ на величину:

$$\Delta W_{BV}^{BEP} = \sum i \cdot \Delta E_i^{BEP} \quad (5)$$

де:  $\Delta E_i^{BEP}$  – зменшення відбору вторинної пари з  $i$ -того корпусу ВУ за рахунок використання теплоти ВЕР.

Оскільки  $W_{BV}^{необ}$  залишається незмінною, постає задача компенсації зменшення фактичної продуктивності ВУ на величину  $\Delta W_{BV}^{BEP}$ .

Найбільш простим способом розв'язання цієї задачі є збільшення надходження пари в БК за умови, що останній корпус чи концентратор спроможний сприйняти додаткове навантаження.

Будь-яке зменшення відбору вторинної пари з  $i$ -того корпусу на величину  $\Delta E_i$ , за умови компенсації відповідного зменшення продуктивності ВУ на величину  $\Delta W_{BV}^1 = i \cdot \Delta E_i$  додатковим надходженням пари з останнього корпусу чи концентратора в БК, дозволяє зменшити витрату пари на ВУ на величину:

$$\Delta D_{BV} = \frac{\langle n \cdot \text{або} \cdot (n+1) \rangle - i}{n \cdot \text{або} \cdot (n+1)} \Delta E_i \quad (6)$$

#### А) Розглянемо ефективність використання теплоти джерел 1, 3, 4 ВЕР.

При зменшенні відборів вторинної пари з  $n$ -ного корпусу, при використанні теплоти зазначених вище 1, 3, 4 джерел ВЕР, на величину  $\sum \Delta E_n^{BEP} = \Delta E_1^n + \Delta E_3^n + \Delta E_4^n$  продуктивність ВУ зменшиться на величину

$$(\Delta W_{BV}^{BEP})^* = n \cdot \sum \Delta E_n^{BEP} \quad (7)$$

Відповідне додаткове надходження пари в БК становитиме - для ВУ без концентратора:

$$(\Delta W_{BV}^{BEP})^* = n \cdot \sum \Delta E_n^{BEP} = n \cdot \Delta D_k, \quad (8)$$

звідки  $\Delta D_k = \sum \Delta E_n^{BEP}$ ,

для ВУ з концентратором:

$$(\Delta W_{BV}^{BEP})^* = n \cdot \sum \Delta E_n^{BEP} = (n+1) \Delta D_k, \quad (9)$$

звідки  $\Delta D_k = \frac{n}{n+1} \sum \Delta E_n^{BEP}$ .

Зменшення витрати пари для ВУ без концентратора становитиме:

$$\Delta D_{BV} = \frac{n-n}{n} \sum \Delta E_n^{BEP} = 0, \quad (10)$$

а для ВУ з концентратором:

$$\Delta D_{BV} = \frac{n+1-n}{n+1} \sum \Delta E_n^{BEP} = \frac{1}{n+1} \sum \Delta E_n^{BEP} \quad (11)$$

Отже, щоб отримати максимальне зменшення витрати пари на ВУ за рахунок використання теплоти ВЕР (мова йде про зазначені вище 1, 3, 4 джерела ВЕР) треба застосувати інші способи регулювання продуктивності ВУ. Як видно з формул (10) і (11) забезпечення необхідної продуктивності додатковим надходженням пари в БК дає нульове (формула 10) або мінімальне (формула 11) зменшення витрати пари на ВУ.

#### Такими іншими способами можуть бути:

1. Перенесення відборів вторинної пари з головних корпусів на наступні.

1.1. Очевидно, що при незмінному температурному режимі на корпусах ВУ та впорядкованій системі паровідборів з них, таке перенесення паровідборів неможливе, а отже використання теплоти зазначених вище джерел ВЕР 1.3.4 дасть мінімальний або нульовий ефект.

2.1. Часткове перенесення відборів з головних корпусів на наступні при певному підвищенні температури вторинної пари з корпусів ВУ, яке дозволило б перенести відбір пари на вакуум-апарати на 3-ій корпус та відбір пари на окремі споживачі з 4-го на 5-й корпус.

Одержаний при цьому приріст продуктивності ВУ  $\Delta W_{BV}^{\text{доп}}$  компенсує зменшення продуктивності ВУ на величину  $(\Delta W_{BV}^{BEP})^*$ , тобто:

$$\Delta W_{BV}^{\text{доп}} = (\Delta W_{BV}^{BEP})^* \quad (12)$$

Тоді, зменшення витрати пари на ВУ,  $\Delta D_{BV}^*$ , визначиться як сума зменшень величин відборів вторинної пари з останнього корпусу за рахунок використання теплоти 1,3,4 джерел ВЕР, тобто

$$\Delta D_{BV}^* = \Delta E_1^n + \Delta E_3^n + \Delta E_4^n \quad (13)$$

2. Перехід до ВУ з підвищеним температурним режимом (з підвищенням температури кипіння в першому корпусі ВУ до  $135^\circ\text{C}$ ) дозволяє перенести відбори вторинної пари з 1-го корпусу на 2-ий, з 2-го на 3-ій, з 3-го на 4-ий, з 4-го на 5-ий і збільшити продуктивність ВУ на величину  $(\Delta W_{BV}^{\text{доп}})' = \sum E_i$ . При цьому, з урахуванням ліквідації надходження пари в БК, фактична продуктивність ВУ, обрахована через нові відбори вторинної пари з корпусів ВУ,  $(W_{BV}^{\text{факт}})^*$ , істотно перевищуватиме необхідну продуктивність, тобто появляється запас продуктивності ВУ (надлишкова продуктивність ВУ),  $\Delta W_{BV}^{\text{зан}}$ ,

$$\Delta W_{BV}^{зан} = (W_{BV}^{факт})^* - W_{BV}^{необ} = \Sigma E_i^o - S_{ПВУ} \left(1 - \frac{CP_{ПВУ}}{CP_{сир}}\right), \quad (14)$$

де:  $E_i^o$  - величина відбору вторинної пари з і-того корпусу після підвищення температурного режиму.

За наявності надлишкової продуктивності,  $\Delta W_{BV}^{зан}$ , забезпечення  $W_{BV}^{необ}$  можна досягти включенням міжкорпусних перепусків пари – з трубопроводів вторинної пари більшого тиску в трубопровід вторинної пари меншого тиску. Це забезпечуватиме зменшення продуктивності ВУ на величину  $\Delta W_{BV}^{неп}$  аж до вичерпання запасу продуктивності ВУ, коли:

$$\Delta W_{BV}^{неп} = \Delta W_{BV}^{зан} \quad (15)$$

Для випадку, що розглядається, через зменшення відборів вторинної пари з останнього корпусу продуктивність ВУ зменшується на величину:

$$(\Delta W_{BV}^{БЕР})^* = n \cdot \Sigma \Delta E_n^{БЕР} = n (\Delta E_1^n + \Delta E_3^n + \Delta E_4^n), \quad (16)$$

яка компенсується частковим зменшенням міжкорпусних перепусків пари з тим, щоб:

$$(\Delta W_{BV}^{БЕР})^* = (\Delta W_{BV}^{неп})' = n (\Delta E_1^n + \Delta E_3^n + \Delta E_4^n) \quad (17)$$

Таким чином забезпечується максимальне зменшення витрати пари на ВУ, яке дорівнює сумі величин зменшення відборів вторинної пари з останнього корпусу за рахунок використання теплоти ВЕР (формула 13).

3. Використання в схемі ВУ пароструминних (ПК) чи механічних (МК) компресорів, які стискають вторинну пару нижчого тиску до більш високого тиску. Збільшенням або зменшенням відбору вторинної пари в ПК чи МК можна збільшити або зменшити продуктивність ВУ на величину:

$$\Delta W_{BV}^{комп} = (m-k) \cdot \Delta E_m^{комп}, \quad (18)$$

де:  $\Delta W_{BV}^{комп}$  - величина зміни продуктивності ВУ, m- номер корпусу ВУ, вторинна пара з якого у кількості  $\Delta E_m^{комп}$  стискається, k- номер корпусу ВУ, до тиску вторинної пари якого стискається відібрана з корпусу m вторинна пара (якщо вторинна пара з корпусу m стискається до тиску пари, що надходить як грійна в перший корпус ВУ, то k = 0).

За рахунок  $\Delta W_{BV}^{комп}$  ліквідується дефіцит продуктивності  $(\Delta W_{BV}^{БЕР})^*$ , а витрата пари на ВУ зменшується на максимальну величину  $\Delta D_{BV}^*$  (формула 13).

Таким чином до прийняття рішення щодо використання теплоти 1, 3, 4 джерел ВЕР необхідно провести розрахунок системи теплоенерговикористання заводу, визначивши величину  $W_{BV}^{необ}$  та яким чином забезпечується умова  $W_{BV}^{необ} = W_{BV}^{факт}$ .

**При цьому треба мати на увазі таке:**

1. Якщо  $W_{BV}^{необ}$  не забезпечується лише наявними відборами вторинної пари з корпусів ВУ і існує потреба в надходженні певної кількості пари в БК (формула 4), то використання теплоти з 1, 3,

4 джерел ВЕР не приведе до зменшення витрати пари на технологічні потреби (формула 9 для ВУ без концентратора), або забезпечить лише мінімальну ефективність (формула 10 для ВУ з концентратором).

2. Щоб одержати максимальне зменшення витрати пари на ВУ (формула 13) необхідно вжити заходи щодо забезпечення запасу продуктивності ВУ при зменшених, за рахунок використання теплоти 1, 3, 4 джерел ВЕР, величинах відборів вторинної пари з корпусів ВУ і ліквідації надходження пари в БК (ці заходи розглянуті в пунктах 2, 3).

**Б) Розглянемо ефективність використання теплоти конденсатів з головних корпусів ВУ (джерело 2 ВЕР).**

1) В практиці роботи цукрових заводів широко використовують теплоту конденсатів відпрацьованої пари для нагрівання соку в підігрівнику 1-ої групи перед ВУ.

Якщо в ТЕЦ цукрового заводу експлуатуються деаератори середнього тиску з робочою температурою 135°C, то недоцільно охолоджувати в тепловій схемі заводу конденсат, що повертається в ТЕЦ. Відібрана від нього теплота на нагрівання соку буде компенсована такою ж кількістю теплоти, що має надійти в деаераторну колонку з парою після РОУ власних потреб ТЕЦ. При цьому енергетична вигода відсутня і, навпаки, можлива перевитрата теплової енергії на величину:

$$\Delta D_k = \frac{i}{(n \text{ або } o(n+1))} \Delta E_i \quad (19)$$

Де:  $\Delta D_k$  - додаткове надходження пари в БК, що компенсує зменшення продуктивності ВУ на величину  $i \Delta E_p$ ,

$\Delta E_i$  - зменшення відбору пари з і-того корпусу за рахунок використання теплоти конденсату.

Якщо в ТЕЦ експлуатуються деаератори атмосферного тиску, то оптимальною температурою конденсату, який повертається в ТЕЦ, слід вважати 100°C. Температура в деаераторі при робочому тиску 1,2 бар дорівнює 104,8°C. Для нагрівання конденсату в деаераторній колонці від 100°C до 104,8°C використовується теплота пари, що постійно надходить в деаератор після розширювача безперервної продувки та після розширювача дренажів низького тиску.

Доцільним слід вважати використання теплоти конденсатів, що повертаються в ТЕЦ, для нагрівання соку, якщо температура цього конденсату на виході з конденсатної схеми не менша 105°C.

В реальних конденсатних схемах конденсатом відпрацьованої пари у кількості  $G_{конд}^{відп}$  нагрівають сик перед ВУ до температури 103-108 °C, охолоджуючи конденсат від початкової температури  $t_{конд}^{поч}$  у збірнику конденсатної схеми до 100°C. За рахунок теплоти, відібраної від конденсату у кількості  $Q_{конд}^{відп} = G_{конд}^{відп} \cdot c \cdot (t_{конд}^{поч} - 100)$ , зменшується відбір вторинної пари з 2-го корпусу на величину  $\Delta E_2$ :

$$\Delta E_2 = \frac{Q_{\text{конд}}^{\text{відп}}}{h_2^n - h_2^k}, \quad (20)$$

де:  $h_2^n$  - ентальпія вторинної сухої насиченої пари з 2-го корпусу ВУ,  
 $h_2^k$  - ентальпія конденсату, що відводиться з підігрівника.

Як вже розглядалось раніше, максимально досяжне зменшення витрати пари на ВУ може дорівнювати  $\Delta D_{\text{ВУ}}^{\text{макс}} = \Delta E_2$ , (21)

$$\text{а мінімальне } \Delta D_{\text{ВУ}}^{\text{мін}} = \frac{n-2}{n} \Delta E_2. \quad (22)$$

Альтернативним рішенням є каскадне охолодження конденсату від  $t_{\text{поч}}$  до  $100^\circ\text{C}$  в конденсатній схемі з метою одержання пари самовипаровування  $e_1, e_2$  і  $e_3$ .

При цьому максимальне зменшення витрати пари на ВУ дорівнюватиме

$$(\Delta D_{\text{ВУ}}^{\text{макс}})' = e_1 + e_2 + e_3, \quad (23)$$

Мінімальне зменшення витрати пари на ВУ дорівнюватиме:

$$(\Delta D_{\text{ВУ}}^{\text{мін}})' = \frac{n-1}{n} e_1 + \frac{n-2}{n} e_2 + \frac{n-3}{n} e_3 \quad (24)$$

Для температурного режиму 4-х корпусної з концентратом ВУ, з урахуванням різної теплоти утворення пари самовипаровування  $e_1, e_2, e_3$ , при використанні теплоти конденсату відпрацьованої пари для нагрівання соку, що надходить на ВУ, максимально можливе зменшення витрати пари на ВУ,  $\Delta D_{\text{ВУ}}^{\text{макс}}$ , більше за  $(\Delta D_{\text{ВУ}}^{\text{макс}})'$  при каскадному охолодженні конденсату приблизно на 1 кг. пари/тонну буряків, тобто:

$$\delta D_{\text{ВУ}}^{\text{макс}} = \Delta D_{\text{ВУ}}^{\text{макс}} - (\Delta D_{\text{ВУ}}^{\text{макс}})' = 1 \text{ кг/т} \quad (25)$$

Мінімально можливе зменшення витрати пари на ВУ (що відповідає реальним умовам експлуатації ВУ) також більше на приблизно 0,6 кг/т для випадку використання теплоти конденсату в підігрівнику, тобто:

$$\delta D_{\text{ВУ}}^{\text{мін}} = \Delta D_{\text{ВУ}}^{\text{мін}} - (\Delta D_{\text{ВУ}}^{\text{мін}})' = 0,6 \text{ кг/т}. \quad (26)$$

В той же час, охолодження конденсату шляхом каскадного перепуску простіше в його реалізації.

2) Використання теплоти конденсату вторинної пари 1-го корпусу ВУ:

а) для нагрівання соку в конденсато-сокових підігрівниках:

1а) для нагрівання соку перед ВУ, охолоджуючи конденсат від початкової температури в збірнику до температури  $100^\circ\text{C}$  та зменшуючи при цьому відбір вторинної пари з 2-го корпусу на величину  $\Delta E_2^*$ , яка визначається аналогічно до формули (20);

2б) для нагрівання соку перед 2-ою сатурацією

в підігрівнику 1-ої групи від  $83^\circ\text{C}$  до  $89^\circ\text{C}$ , зменшуючи відбір вторинної пари з 2-го корпусу на ту ж величину  $\Delta E_2^*$ .

Тоді, в обох можливих випадках використання теплоти конденсатів для нагрівання соку максимальне зменшення витрати пари на ВУ дорівнює:

$$(\Delta D_{\text{ВУ}}^{\text{макс}})' = \Delta E_2^*, \quad (27)$$

за умови наявності в системі регулювання продуктивності ВУ міжкорпусних перепусків пари, ПК чи МК, які компенсують зменшення продуктивності ВУ на величину

$$\Delta W_{\text{ВУ}}^* = 2 \cdot \Delta E_2^*. \quad (28)$$

Якщо ж зменшення продуктивності ВУ на величину  $\Delta W_{\text{ВУ}}^*$  ліквідується за рахунок додаткового надходження пари в БК, то одержимо мінімальне зменшення витрати пари на ВУ, яке дорівнюватиме:

$$(\Delta D_{\text{ВУ}}^{\text{мін}})'' = \frac{n-2}{n} \Delta E_2^* \quad (29)$$

б) Для одержання пари самовипаровування

1б) При каскадному охолодженні конденсату вторинної пари 1-го корпусу в конденсатній схемі з одержанням пари самовипаровування  $(\Delta e_2)'$  і  $(\Delta e_3)'$  максимальне зменшення витрати пари на ВУ дорівнюватиме:

$$(\Delta D_{\text{ВУ}}^{\text{макс}})^* = (\Delta e_2)' + (\Delta e_3)' \quad (30)$$

за умови компенсації зменшення продуктивності ВУ на  $(\Delta W_{\text{ВУ}}^*)' = 2(\Delta e_2)' + 3(\Delta e_3)'$  міжкорпусними перепусками пари, ПК чи МК.

За умови компенсації  $(\Delta W_{\text{ВУ}}^*)'$  додатковим надходженням пари в БК мінімальне зменшення витрати пари на ВУ буде:

$$(\Delta D_{\text{ВУ}}^{\text{мін}})^* = \frac{n-2}{n} (\Delta e_2)' + \frac{n-3}{3} (\Delta e_3)'. \quad (31)$$

Для температурного режиму 4-х корпусної ВУ з концентратом при охолодженні конденсату в підігрівнику величина  $(\Delta D_{\text{ВУ}}^{\text{макс}})'$  (формула 27) приблизно на 0,75 кг/т, а  $(\Delta D_{\text{ВУ}}^{\text{мін}})''$  (формула 29) – приблизно на 0,5 кг/т більші величин, відповідно,  $(\Delta D_{\text{ВУ}}^{\text{макс}})^*$  (формула 30) та  $(\Delta D_{\text{ВУ}}^{\text{мін}})^*$  (формула 31) при каскадному охолодженні конденсату з одержанням пари самовипаровування.

Варто зазначити, що охолодження конденсату шляхом каскадного перепуску більш просте в його реалізації.

**Висновок.** Використання теплоти вторинних енергоресурсів є основним джерелом підвищення енергоефективності цукрового виробництва. Комплексний аналіз ефективності використання вторинних енергоресурсів є методологічною базою розроблення енергоефективних теплотехнологій цукрового виробництва. ■

**Список використаних джерел**

1. М.О. Прядко. Основи теплотехнології цукрового виробництва / М.О. Прядко, М.О. Масліков, В.П. Петренко, В.І. Павелко, В.М. Філоненко – Вінниця : «Нова книга», 2007. – 295 с.