

Удосконалення випарних установок цукрових заводів

*М.О. Прядко, В.Н. Петренко, В.М. Філоненко
Український державний університет харчових технологій*

Наведено аналіз різних типів випарних установок (ВУ) цукрових заводів, проаналізовано фактори, що не дозволяють у рамках існуючих у промисловості 4–корпусних випарних установок з концентратом досягти низької витрати теплової енергії на технологічні потреби в реальних умовах роботи заводу.

Зменшення витрати палива на переробку цукрових буряків значною мірою обмежується існуючою на більшості цукрових заводів 4-корпусною випарною установкою (ВУ) з концентратом. Це пов'язано з такими обставинами:

1. На багатьох цукрових заводах фактична відкачка дифузійного соку перевищує прийнятну нормативну - 120% до маси буряків, на що звичайно розраховані ВУ. При цьому одержання сиропу бажаної концентрації пов'язане з

необхідністю збільшення продуктивності ВУ на величину $\Delta W'_{\text{ВУ}}$, значення якої наближається до абсолютного збільшення відкачки. Воно забезпечується частковим збільшенням відбору пари на нагрівання соку, а також додатковим виходом пари на конденсатор з концентратора, який працює, як 5-й корпус. Можливість навантаження концентратора обмежена малою площею поверхні нагріву та низькою інтенсивністю теплообміну. Додатковий відбір та вихід пари на конденсатор зумовлюють збільшення витрати пари на ВУ.

2. Економічно доцільно збільшувати концентрацію сиропу після ВУ до 70-72% СР, оскільки кожний процент збільшення концентрації може зменшити витрати пари на технологічні потреби до 4,4 кг/т буряків. У свою чергу це пов'язано з необхідністю збільшити продуктивність ВУ на величину $\Delta W''_{\text{ВУ}}$.

3. За рахунок максимального використання вторинних енергоресурсів (ВЕР) можна зменшити

витрату пари на ВУ на величину $\sum_{i=1}^4 \Delta E_i$ (ΔE_i -

зменшення відбору вторинної пари з i -го корпусу за рахунок використання ВЕР). Це пов'язано з необхідністю компенсувати зниження продук-

тивності ВУ на величину $\Delta W'''_{\text{ВУ}} = \sum_{i=1}^4 i \cdot \Delta E_i$.

За зазначених обставин сумарний дефіцит продуктивності ВУ ($W_{\text{сум}}$) становитиме $W_{\text{сум}} = \Delta W'_{\text{ВУ}} + \Delta W''_{\text{ВУ}} + \Delta W'''_{\text{ВУ}}$.

Він не може бути забезпеченим найбільш економічним способом (без додаткового виходу пари на конденсатор) в умовах існуючого режиму відбору вторинної пари і температурного режиму на 4-корпусній ВУ з концентратором (4 КК).

Загальновідомо, що це можливо за умови переходу до 5-корпусної ВУ з підвищеним температурним режимом (ПТР), яка дозволяє при мінімальних (за рахунок максимального використання ВЕР) відборах вторинної пари на споживачі забезпечити збільшення продуктивності на величину $\Delta W_{\text{сум}}$ за рахунок перенесення відборів вторинної пари на наступні корпуси і збільшення кратності випаровування до 5.

Усі вдосконалення ВУ ґрунтуються на максимальному врахуванні обставин, викладених у пунктах 1-3. Повною мірою вони також ураховані розробленою НВО "Цукор" і рекомендованою в 1982 р. як типовою ВУ з підвищеним температурним режимом на базі випарних апаратів із багаторазовою природною циркуляцією. Ця ВУ має дещо умовно підвищений температурний режим (температура кипіння в першому корпусі 129 °С проти 126 у ВУ 4 КК),

з чим пов'язані зменшення корисної різниці температур по корпусах ВУ і зростання питомої сумарної площі поверхні теплообміну. Цьому сприяє також запропонована система регулювання продуктивності ВУ виходом пари на конденсатор у межах до 50 кг на 1 т цукрових буряків, що при відхиленні режиму її роботи від розрахункового зменшує економічність ВУ.

Повноцінний підвищений температурний режим пов'язаний із підвищенням температури кипіння соку в першому корпусі ВУ до 135 °С, що дозволяє на інших корпусах одержати вторинну пару параметрів, наближених до таких на ВУ 4 КК.

Підвищення температури кипіння соку до 135 °С у першому корпусі 5-корпусної ВУ з ПТР, а також прагнення найраціональніше використати загальний температурний перепад на ВУ $\Delta t_{\text{ВУ}}^{\text{заг}}$

($\Delta t_{\text{ВУ}}^{\text{заг}}$ - різниця між температурою насичення водяної пари, що надходить на перший корпус і температурою вторинної пари з останнього корпусу ВУ) при одержанні оптимальних теплотехнологічних умов проходження процесу упарювання соку вимагає використання однопрохідних, випарних апаратів (ОВА) замість випарних апаратів із багаторазовою природною циркуляцією.

Науковцями і інженерами України на основі всебічних досліджень розроблені, виготовлені і випробувані конструкції ОВА типу ВАПП і А2-ПВД. Випарний апарат прямоточно-плівковий типу ВАПП, розроблений працівниками НВО "Цукор", передбачає спочатку підйомний рух парорідинної суміші в підйомному пучку, а потім рух рідини у вигляді гравітаційно-стікаючої плівки в опускному пучку. ОВА типу А2-ПВД, розроблений працівниками УДУХТ і НВО "Харчомаш", передбачає рух парорідинної суміші лише в підйомному пучку. Зазначені ОВА успішно пройшли заводські випробування і по них розроблена технічна документація для серійного виробництва всіх типорозмірів апаратів. Науковцями і інженерами УДУХТ і НВО "Харчомаш" спроектовано і виготовлено експериментальний ОВА з гравітаційно стікаючою плівкою площею поверхні нагріву 1550 м².

Аналіз режимів роботи ОВА в умовах 5-корпусної ВУ з ПТР, а також закордонний досвід свідчать про доцільність використання на останніх корпусах ОВА з гравітаційно стікаючою плівкою розчину завдяки їх перевазі порівняно з ОВА інших гідравлічних схем - відсутності гідростатичної депресії. Теплотехнологічні показники роботи ОВА з гравітаційно стікаючою плівкою та інших гідравлічних схем (з підйомним чи комбінованим підйомно-опускним рухом парорідинного потоку) у режимі головних

корпусів 5-корпусної ВУ з ПТР мало різняться між собою. Це дозволяє використовувати для головних корпусів згадані вище апробовані конструкції ОВА типу ВАПП чи А2-ПВД.

Актуальним на сьогодні є завдання всебічного випробування дослідного зразка ОВА з гравітаційно стікаючою плівкою рідини площею поверхні нагріву 1500 м² у режимі роботи 3-5-го корпусів 5-корпусної ВУ з ПТР. Позитивні результати випробувань дозволяють розробити вітчизняні плівкові ОВА і тим самим закласти науково-технічну базу реконструкції систем теплоенергоспоживання цукрових заводів з метою максимально можливого зменшення витрати палива на технологічні потреби на основі широкого впровадження однопрохідних 5-корпусних ВУ з ПТР, оснащених ОВА на всіх корпусах.

Зрозуміло, що завдяки зменшенню тривалості перебування розчину в однопрохідній ВУ з ПТР (до 3-5 хв повного часу перебування розчину в кожному корпусі) і відсутності можливості акумулювати певну кількість розчину в ОВА зростають вимоги до забезпечення постійного надходження на ВУ соку в кількості, яка б виключала кризові режими роботи ОВА. Тобто необхідна надійна система автоматичного регулювання роботи однопрохідної ВУ. Принциповим у цій системі має стати можливість забезпечення необхідної продуктивності ВУ в умовах зміни технологічного режиму роботи заводу і режиму відборів вторинної пари при постійній відсутності виходу пари на конденсатор за рахунок головного регулювання ВУ. Воно повинно передбачати регулювання перепусками пари, зміною відборів пари на пароструминні чи механічні компресори у межах їх реальних можливостей.

Суттєві доробки, що мають НВО "Цукор", УДУХТ та НВО "Харчомаш" з цього питання, дозволяють успішно розв'язати проблему.

Як зазначалось в [1], наявність апробованих конструкцій ОВА типу ВАПП чи А2-ПВД дозволяє реконструювати 4-корпусні ВУ з концентратором у 5-корпусні ВУ з ПТР. Цього можна досягти, якщо додати до існуючих ВУ 4КК передвключений ОВА. Не змінюючи температурного режиму на існуючих корпусах ВУ та ліквідувавши концентратор (або об'єднавши його з існуючим 4-м корпусом), за допомогою установки додаткового передвключеного однопрохідного ВА одержуємо 5-корпусну ВУ з ПТР.

При незмінних відборах вторинної пари з корпусів ВУ тиск пари, що споживає передвключений корпус, збільшується на величину, еквівалентну збільшенню температури насичення цієї пари на значення корисної різниці температур, якою забезпечується робота передвключеного корпусу. Підвищення темпе-

ратури насичення відпрацьованої пари після турбіни, що надходить на ВУ, пов'язано із збільшенням питомої витрати на 1 кВт·год електроенергії, що виробляється турбогенератором, і при незмінному електричному навантаженні призводить до збільшення кількості відпрацьованої пари, як це видно з формули

$$D_{\text{турб}} = \frac{3600N}{(i_0 - i_{\text{прот}})\eta_{\text{ем}}} \quad (1)$$

де $D_{\text{турб}}$ - кількість відпрацьованої пари після турбіни при виключених механічних компресорах, кг/т буряків; N - електричне навантаження турбогенератора, кВт/т буряків; $i_0, i_{\text{прот}}$ - ентальпія пари відповідно перед турбіною і після неї, кДж/кг; $\eta_{\text{ем}}$ - електромеханічний ККД турбогенератора.

Ураховуючи, що технологічні потреби забезпечуються парою після турбіни і РОУ, тобто

$$D_{\text{техн}} = D_{\text{турб}} + D_{\text{РОУ}} \quad (2)$$

бачимо, що збільшення кількості відпрацьованої пари після турбіни на величину $\Delta D_{\text{турб}}$ можливе за рахунок зменшення кількості пари, яку одержано після РОУ $D_{\text{РОУ}}$, тоді як абсолютна допустима величина збільшення кількості пари після турбіни повинна бути менше величини $D_{\text{РОУ}}$, оскільки в результаті переходу до 5-корпусної ВУ з ПТР витрата пари на технологічний процес повинна зменшитись на величину $\Delta D_{\text{техн}}$.

Граничну ситуацію можна описати рівнянням

$$D'_{\text{техн}} = D'_{\text{турб}} \quad (3)$$

де

$$\begin{aligned} D'_{\text{техн}} &= D_{\text{техн}} - \Delta D_{\text{техн}}; \\ D'_{\text{турб}} &= D_{\text{турб}} - \Delta D_{\text{турб}}. \end{aligned}$$

Звідси

$$D_{\text{РОУ}} = D_{\text{техн}} + D_{\text{турб}} \quad (4)$$

Зазначене свідчить, що очікувана ефективність переходу на 5-корпусну ВУ з ПТР залежить від параметрів пари після парогенераторів, величин тепло- і електроспоживання та схеми їх забезпечення в умовах кожного окремого заводу.

Максимально можливий приріст продуктивності ВУ в результаті використання одиничних передвключених ОВА як перших корпусів 5-корпусних ВУ з ПТР дорівнює сумі величин відборів вторинної пари

$$\Delta W_{\text{ВУ}} = \sum_{i=1}^5 E_i \quad (5)$$

При цьому з'являється можливість зменшити витрати пари на ВУ без будь-яких додаткових заходів за рахунок ліквідації виходу пари на конденсатор і збільшення концентрації сиропу до розрахункової.

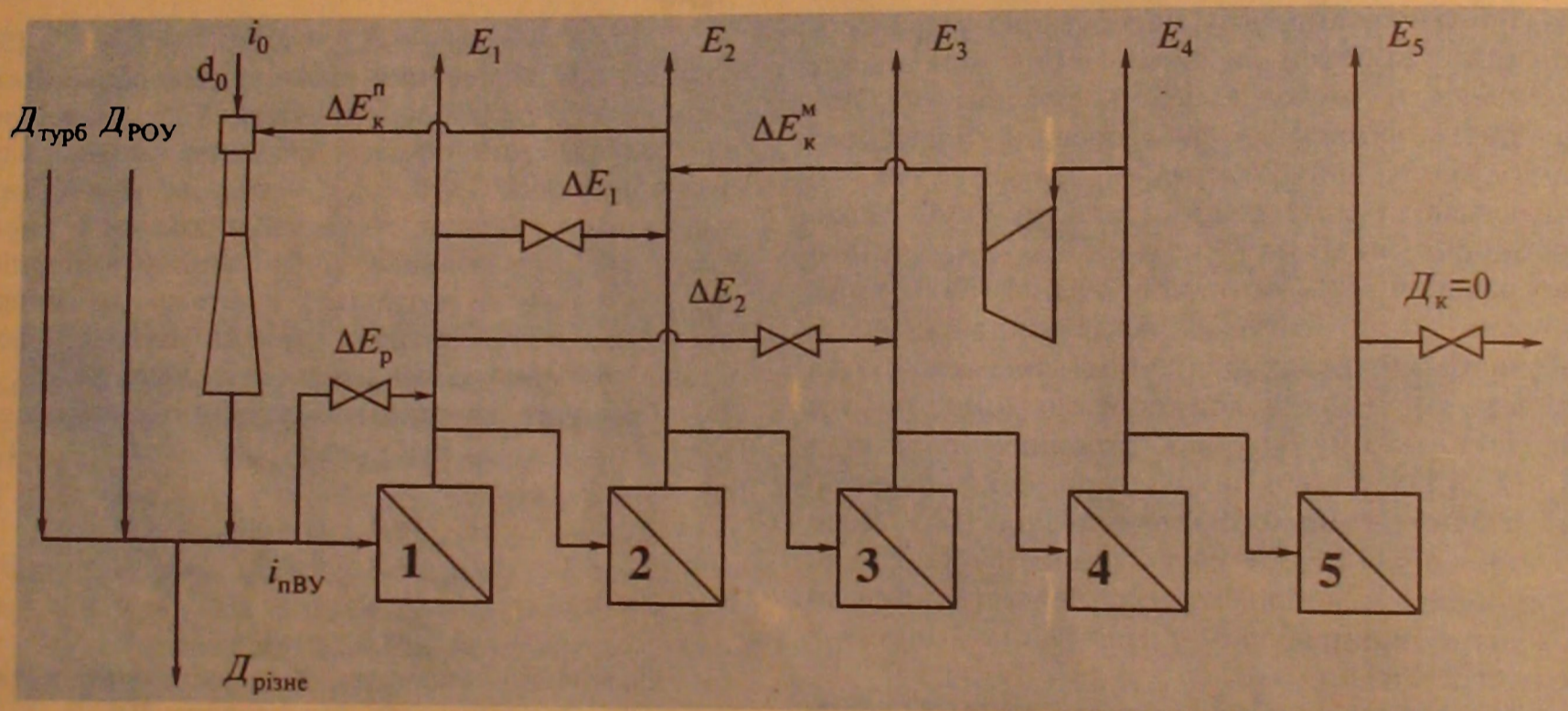
Як правило, на першому етапі реконструкції ВУ одержаний приріст продуктивності $\Delta W_{\text{ВУ}}$ не

обмежується зменшенням продуктивності ВУ за рахунок ліквідації виходу пари на конденсатор $\Delta W'_{\text{ВУ}}$ та витратою частини приросту на забезпечення розрахункової концентрації сиропу $\Delta W''_{\text{ВУ}}$, тобто залишається ще запас продуктивності $\Delta W'_{\text{ВУ}}^{\text{заг}}$:

$$\Delta W'_{\text{ВУ}}^{\text{заг}} = \Delta W'_{\text{ВУ}} - \Delta W'_{\text{ВУ}}' - \Delta W'_{\text{ВУ}}'' \quad (6)$$

Наявність запасу продуктивності $\Delta W'_{\text{ВУ}}^{\text{заг}}$ дозволяє впроваджувати апробовані науково-технічні рішення по використанню ВЕР замість відборів вторинної пари, зменшувати витрати пари на ВУ доти, поки запас продуктивності не буде повністю вичерпаний, тобто коли

$$\Delta W'_{\text{ВУ}}^{\text{заг}} = \sum_{i=1}^5 \Delta E_i \quad (7)$$



Узагальнена принципова схема 5-корпусної ВУ з довільним розташуванням перепусків та компресорів.

Таким чином, наявність випробуваних конструкцій ОВА дозволяє з мінімальними витратами здійснювати реконструкцію існуючих ВУ 4КК із створенням на їх базі 5-корпусних ВУ з ПТР і суттєво зменшувати витрати палива на технологічні потреби.

Досвід таких реконструкцій, частково здійснених на Перегонівському та Долинському цукрових заводах, показує, що при їх проведенні треба враховувати такі фактори:

1. Сумарна поверхня нагріву ВУ збільшується за рахунок додаткової площі поверхні нагріву ОВА. При повній реконструкції всієї випарної установки, пов'язаній із заміною всіх випарних апаратів, сумарна питома поверхня нагріву знаходиться у тих же межах, що і для 5-корпусної ВУ з ПТР на базі випарних апаратів з багаторазовою природною циркуляцією.

2. Необхідність підвищення температури кипіння соку в ОВА (до 135 °С) повинна бути узгоджена з термостійкістю соку, що надходить на упарювання.

3. Щоб компенсувати можливі при певних властивостях соку технологічні втрати за рахунок збільшення концентрації соку, особливо в другому та третьому корпусах, при незмінній температурі кипіння в них, доцільно ставити однопрохідні випарні апарати на першому і другому корпусах реконструйованої 5-корпусної ВУ з ПТР, залишаючи на інших корпусах випарні апарати з багаторазовою природною циркуляцією.

Як згадувалось вище, найбільш економне головне регулювання роботи 5-корпусної ВУ з ПТР передбачає можливість використання в схемі ВУ пароструминних чи механічних компресорів, а також регулювання перепусками. Узагальнена принципова схема такої ВУ з

довільним розташуванням перепусків та компресорів показана на рисунку.

Фактична продуктивність такої ВУ в кожний момент її роботи повинна дорівнювати необхідній продуктивності:

$$W'_{\text{ВУ}}^{\text{факт}} - W'_{\text{ВУ}}^{\text{необх}} = S_{\text{пвУ}} \left(1 - \frac{C_{\text{рпвУ}}}{C_{\text{сир}}} \right) - E_1 + 2E_2 + 3E_3 + 4E_4 + 5E_5 + 2\Delta E_{\text{к}}^{\text{п}} + 2\Delta E_{\text{к}}^{\text{м}} - (\Delta E_{\text{р}} + E_1 + 2\Delta E_2) \quad (8)$$

де $S_{\text{пвУ}}$ - кількість соку, що надходить на ВУ, кг/т буряків; $C_{\text{рпвУ}}$, $C_{\text{сир}}$ - концентрація сухих речовин соку що надходить на ВУ, і сиропу після ВУ, %; $\Delta E_{\text{к}}^{\text{п}}$, $\Delta E_{\text{к}}^{\text{м}}$ - відбір вторинної пари на пароструминний і механічний компресори, кг/т буряків; $\Delta E_{\text{р}}$, ΔE_1 , ΔE_2 - перепуски відпрацьованої пари в трубопровід вторинної пари першого корпусу, вторинної пари першого

корпусу в трубопровод вторинної пари другого корпусу і вторинної пари першого корпусу в трубопровод вторинної пари третього корпусу.

Наведена в формулі (8) сума $\Delta W_{\text{ВУ}}^{\text{заг}} = \Delta E_p + \Delta E_1 + 2\Delta E_2$ - запас продуктивності ВУ, який забезпечується роботою компресорів так, щоб при можливих відхиленнях технологічного режиму від оптимального і зміні величин відборів вторинної пари умова $W_{\text{ВУ}}^{\text{факт}} = W_{\text{ВУ}}^{\text{необ}}$ виконувалась при відсутності виходу пари на конденсатор.

Внесок пароструминного компресора, що стискає вторинну пару корпусу n (згідно із схемою $n=2$) до параметрів гріючої пари на перший корпус ВУ, у загальну продуктивність ВУ становить:

$$\Delta W_{\text{ВУ}}^{\text{пк}} = 2\Delta E_k^n = n\Delta E_k^n. \quad (9)$$

Внесок механічного компресора, що стискає вторинну пару корпусу i (згідно із схемою $i=4$) до параметрів вторинної пари корпусу k (згідно із схемою $k=2$) у загальну продуктивність ВУ становить:

$$\Delta W_{\text{ВУ}}^{\text{мк}} = 2\Delta E_k^m = (i-k)\Delta E_k^m. \quad (10)$$

Оцінімо реально можливу ΔE_k^n . Для пароструминного компресора

$$\Delta E_k^n = u d_0, \quad (11)$$

де u - коефіцієнт інжекції компресора; d_0 - кількість гострої пари (як правило, з колектора пари високого тиску після парогенераторів), кг/т буряків.

Очевидно, що згідно із схемою (рисунок) можна записати

$$D_{\text{техн}} = D_{\text{ВУ}} + D_{\text{різне}} = D_{\text{турб}} + D_{\text{РОУ}} + d_0 \frac{i_0}{i_{\text{пВУ}}}, \quad (12)$$

де $D_{\text{різне}}$ - витрата відпрацьованої пари на інші, крім ВУ, споживачі, кг/т буряків; i_0 , $i_{\text{пВУ}}$ - ентальпія гострої пари, що надходить на пароструминний компресор, та пари, що надходить на ВУ, кг/т буряків.

Із рівняння (12)

$$d_0 = \frac{i_{\text{пВУ}}}{i_0} (D_{\text{техн}} - D_{\text{турб}} - D_{\text{РОУ}}). \quad (13)$$

Максимальне значення величини d_0 відповідатиме умові $D_{\text{РОУ}} = 0$, тобто

$$d_0^{\text{max}} = \frac{i_{\text{пВУ}}}{i_0} (D_{\text{техн}} - D_{\text{турб}}). \quad (14)$$

Як видно з рівняння (14), оскільки всі зусилля спрямовані на максимальне зменшення величини $D_{\text{техн}}$, а величина $D_{\text{турб}}$ відповідно з (1) має тенденцію до зростання (завдяки збільшенню витрати електроенергії N на переробку буряків та зростання $i_{\text{пВУ}}$ при переході на 5-корпусну ВУ

з ПТР) фактична величина d_0^{max} в умовах забезпечення електричного навантаження турбогенератором ТЕЦ обмежена і має тенденцію до подальшого зменшення. За таких умов згідно з (11) і (9), значення величини $\Delta W_{\text{ВУ}}^{\text{пк}}$ досить обмежене.

Як видно з (1) і (14), збільшити навантаження пароструминного компресора можна зменшенням електричного навантаження турбогенератора, що досягається впорядкуванням системи електроспоживання або за рахунок часткового споживання електроенергії з мережі.

Можна стверджувати економічну доцільність зменшення електричного навантаження турбогенератора за рахунок часткового споживання електроенергії з мережі, еквівалентного зростанню навантаження пароструминного компресора, що забезпечує відсутність виходу пари з ВУ на конденсатор в умовах зміни технологічного режиму і режиму відборів вторинної пари.

Максимальна продуктивність механічних компресорів залежить від максимальної кількості електричної енергії, яку вони можуть споживати. При електрозабезпеченні компресорів від турбогенератора ТЕЦ цей максимум споживання електроенергії на них визначається з рівняння

$$N_{\text{комп}}^{\text{max}} = \frac{(D_{\text{техн}} - D_{\text{турб}})(i_0 - i_{\text{прот}})}{3600} \eta_{\text{ем}}. \quad (15)$$

Споживання механічними компресорами електроенергії з мережі економічно доцільно, якщо за рахунок їх роботи в умовах можливих змін технологічного режиму та абсолютних величин відборів вторинної пари необхідна продуктивність ВУ забезпечується при її роботі в оптимальному теплотехнічному режимі, тобто без виходу пари на конденсатор.

Зазначене показує, наскільки важливим для досягнення максимальної економічності системи теплоенергоспоживання цукрових заводів є зменшення витрати електроенергії на технологічні та інші потреби.

Зменшення кількості відпрацьованої пари після парових турбін можливе і за рахунок збільшення потенціалу пари після парових котлів (збільшення величини i_0 у формулі (1)), тобто переходу на парогенератори вищих параметрів порівняно з максимальними параметрами 40 МПа і 450 °С, що є в нашій промисловості.

Техніко-економічні розрахунки [2] показують можливу прийнятність таких варіантів.

Підсумовуючи вищесказане, можна стверджувати:

1. Найбільш оптимальні теплотехнологічні показники роботи випарних установок, що передбачають витрати пари і мінімальні втрати цукру, можуть забезпечити однопрохідні випарні

установки, скомпоновані з однопрохідних випарних апаратів на всіх корпусах ВУ.

2. Впровадження однопрохідних ВУ стримується відсутністю вітчизняних конструкцій плівкових випарних апаратів. Зазначене вимагає проведення найближчим часом всебічного випробування розробленого співробітниками УДУХТ і НВО "Харчомаш" плівкового випарного апарата площею поверхні нагріву 1500 м².

3. Наявність апробованих конструкцій ОВА типу ВАПП і А2-ПВД дозволяє реконструювати існуючі в промисловості випарні установки 5-корпусні ВУ з ПТР з одним чи двома головними

ОВА і забезпечити суттєву економію палива на переробку буряків.

4. Найбільш економічно доцільним є головне регулювання ОВУ на основі застосування пароструминних та механічних компресорів, перепусків пари між корпусами, що забезпечує відсутність виходу пари на конденсатор.

5. Розширення можливостей використання в ОВУ компресорів та перепусків пари пов'язане з необхідністю зменшення витрати електроенергії на технологічні та інші потреби, а також переходом на вищі параметри головного обладнання ТЕЦ.

Бібліографічний список

1. Совершенствование теплоэнергоспользования в сахарной промышленности на базе новых выпарных аппаратов и установок/ Н.А.Прядко, Н.Ю.Тобилевич, Д.А.Столяр и др. // Сахар. пром-сть.-1985. - N2. - С. 25-28.
2. Мохорт В.С., Чикирисов В.Н. Технико-экономическое сравнение установки в ТЭЦ сахарных заводов паровых котлов и турбин на различные параметры // То же. - 1982. - N 6. - С.50-53.

Improvement of the sugar-works evaporator systems

M.O. Pryadko, V.P. Petrenko, V.N. Filonenko

Presented in the paper is analysis of different types of the sugar-works evaporator systems. Also within a scope of the quadruple-effect evaporators with a concentrator, currently in industrial use, analysed were the factors not permitting smaller heat energy consumption to meet process requirements under the real operating condition of sugar-works.

Specified were the lines and conditions for improvement of the heat utilization patterns, namely: application of five-effect evaporators with elevated temperature conditions, based on the single-pass, film-type and direct-flow-film evaporators; introduction of the "HEAD" regulation of evaporator capacity by means of the steam-jet, mechanical-type compressors or by interevaporator passage of the heating and secondary steam.