

Ефективність застосування плівкових випарних апаратів та розрахунок інтенсивності тепловіддачі до киплячих цукрових розчинів в них

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

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

О.М. Рябчук, асистент кафедри теплоенергетики та холодильної техніки, Національний університет харчових технологій

Надані порівняльні розрахунки випарних установок з плівковими випарними апаратами, апаратами Роберта та змішаної конфігурації. Наведено нове співвідношення для розрахунку інтенсивності тепловіддачі до гравітаційно-стікаючих плівок цукрових розчинів в режимі випаровування з вільної поверхні та поверхневого кипіння.

Ключові слова: випарні установки, плівковий випарний апарат, випарний апарат типу Роберта, інтенсивність тепловіддачі, цукрові розчини.

Предоставленные сравнительные расчеты выпарных установок с пленочными выпарными аппаратами, аппаратами Роберта та смешанной конфигурации. Приведено новое соотношение для расчета интенсивности теплоотдачи к гравитационно-стекающим пленкам сахарных растворов в режиме испарения со свободной поверхности и поверхностного кипения.

Ключевые слова: выпарные установки, пленочный выпарной аппарат, выпарной аппарат типа Роберта, интенсивность теплоотдачи, сахарные растворы.

Comparative calculations of evaporating unit with film evaporators, Robert devices and mixed configuration are provided. New ratio for the calculation of heat transfer intensity to the gravity-falling films of the evaporation mode of sugar solutions from free surface and surface of boiling is given.

Keywords: evaporating unit, film evaporator, Robert type evaporator, intensity of heat transfer, sugar solutions.

Концентрування соків в плівкових випарних апаратах має ряд переваг у порівнянні з випарними апаратами Роберта. По-перше, в плівковому режимі відсутня гідростатична температурна депресія, яка стрімко зростає в області вакууму. По-друге, час перебування розчину в плівковому апараті в декілька разів менше, незважаючи на наявність рециркуляції частини соку, або сиропу. Останній фактор важливий при експлуатації випарного апарата в області підвищених температур.

Важливою перевагою плівкових випарних апаратів є те, що інтенсивність тепловіддачі зі зростанням концентрації падає повільно, в той час, як в апаратах з природною циркуляцією має місце стрімке погіршення інтенсивності теплообміну.

Порівняння ефективності випарних установок з апаратами плівкового типу та з природною циркуляцією типа Роберта виконуємо для заводу потужністю 8500 тонн буряків за добу з сучасними технічними рішеннями щодо технічного оснащення технологічної та теплової схеми, а саме:

- завод оснащено жомовими пресами глибокого віджимання;
- фільтрація суспензії 1 сатурації здійснюється в камерних фільтрах;
- на гасіння вапна використовують лише помий та сік;
- продуктове відділення оснащено вакуум-апаратів з механічними циркуляторами;
- дифузійний сік перед попереднім вапнуванням нагрівається утфільною парою;
- на дифузійну установку використовується лише жомо-пресова вода та конденсати;
- жомо-пресова вода нагрівається в 2 ступеня - аміачним конденсатом та парою 3 корпусу ВУ;
- сік перед ВУ нагрівається не ретурною парою, а неохолодженим конденсатом ретурної пари;
- сік перед гарячим вапнуванням нагрівається аміачним конденсатом і максимально вторинною парою 5 корпусу ВУ;
- патоки нагріваються конденсатами у виносних підігрівачах;
- на живлення парою вакуум апаратів використовується відокремлений випарний апарат, який працює в режимі 3 корпусу і на який поступає сульфітований сік.

Розрахунок паро споживання виконуємо за умов:

- дигестія стружки – 15,5%;

- ДБ нормального соку – 86%;
- відкачка соку з дифапаратів – 110 %;
- повернення нефільтрованого соку 1 сатурації на попереднє вапнування – 40%;
- сухі речовини дифузійного соку – 14,9%; сухі речовини соку перед ВУ – 14,4 %.
- витрата сульфатованого соку перед ВУ – 103, 14%.
- концентрація сухих речовин на виході із ВУ – 72 %.

Результати розрахунку потоків соку та парове навантаження корпусів випарної установки наведено в табл.1.

Таблиця 1

Результати розрахунку теплової схеми та навантаження корпусів ВУ

№	Найменування	Розм.	Позн.	№ корпусу випарної установки					
				3о	1	2	3	4	5
1	Витрата соку на випарн. апарат	%	$G_{\text{вх}}$	103,68	93,9	66,56	41	30,24	24,6
2	Витрата соку з випарн. апарата	%	$G_{\text{вих}}$	93,9	66,56	41	30,24	24,6	20,73
3	Конц. соку на вході у випарний апарат	%	$CP_{\text{вх}}$	14,4	15,9	22,43	36,43	49,37	60,7
4	Конц. соку на виході із випарн апарат	%	$CP_{\text{вих}}$	15,9	22,43	36,43	49,37	60,7	72
5	Навантаження по випареній волозі	%	W	9,78	27,34	25,58	10,74	5,64	3,87

Витрата умовного палива на технологічні потреби та вироблення електроенергії - 2,87 кг/тонну буряків (25 м³ газу на тонну буряків).

Розглядаємо варіанти випарної установки з плівковими випарними апаратами, апаратами Роберта та змішаної конфігурації. Типорозміри плівкових випарних апаратів взято з каталогу обладнання Гребінківського машинобудівного заводу.

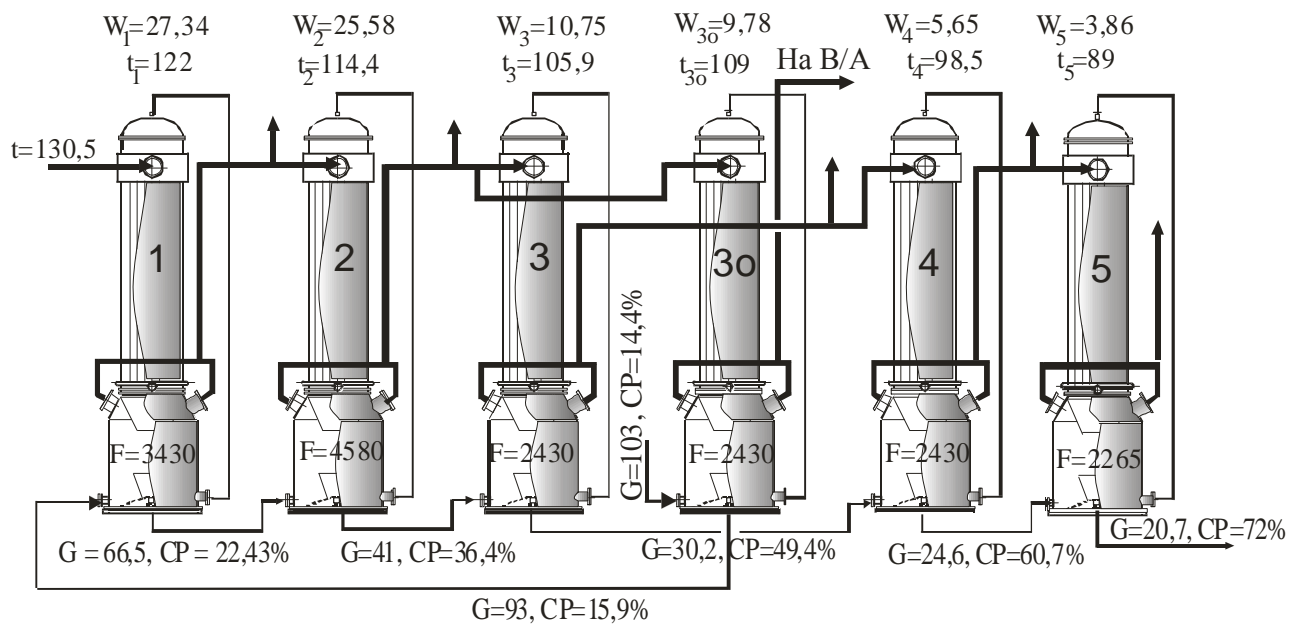


Рис. 1. Температурний режим на випарній установці з плівковими випарними апаратами.

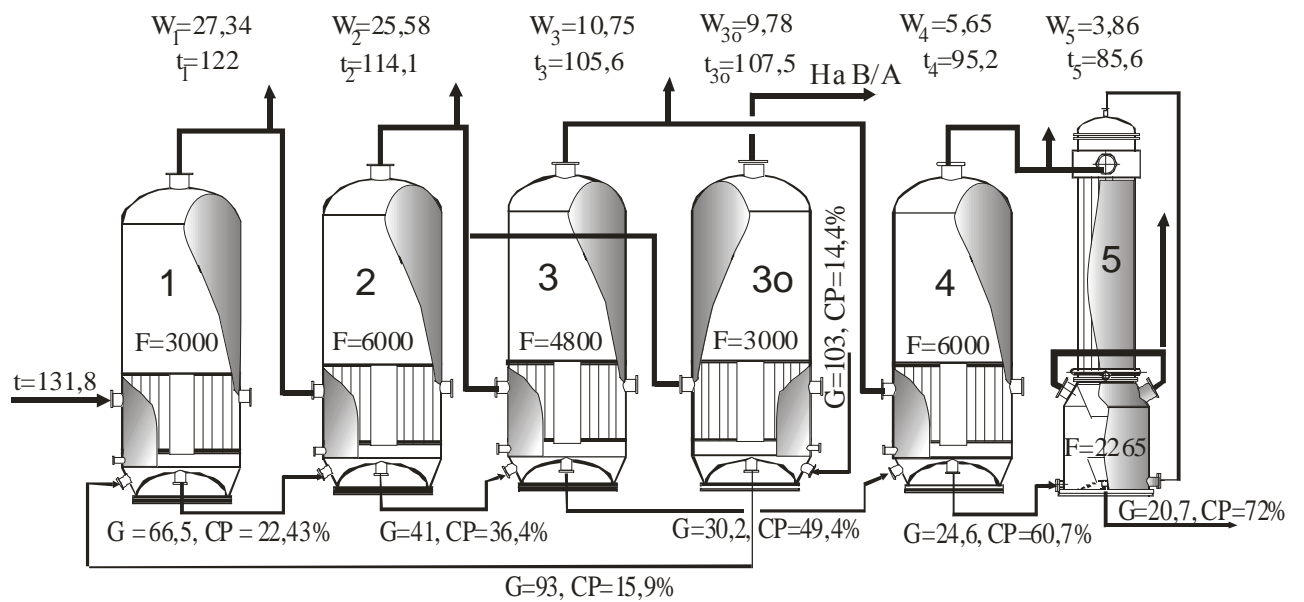


Рис. 2. Температурний режим на випарній установці з апаратами Роберта та останнім плівковим випарним апаратом.

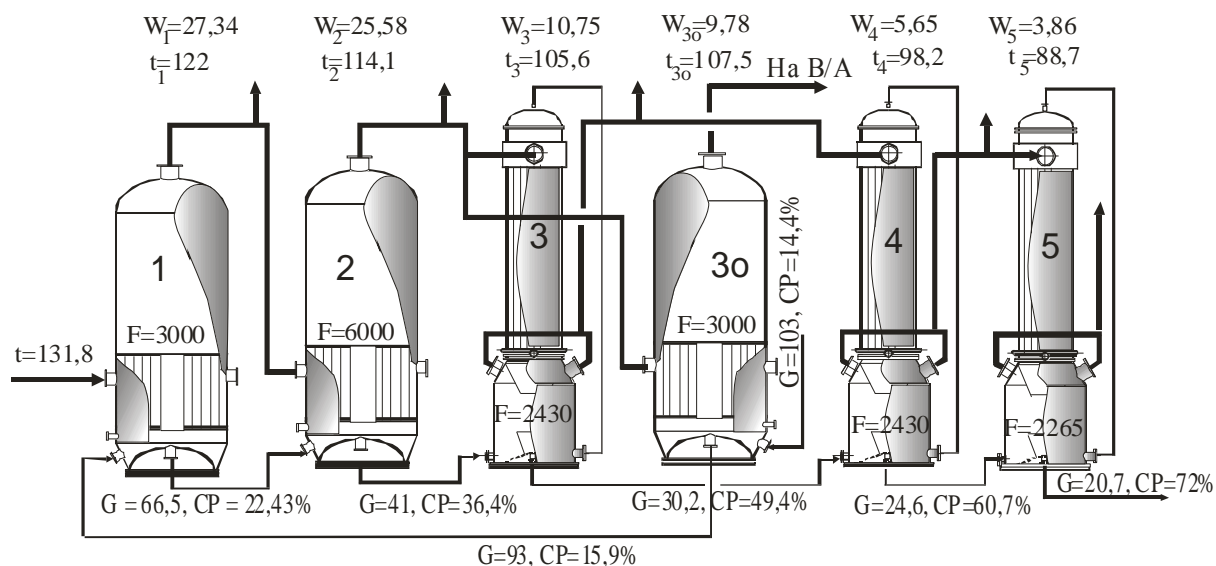


Рис. 3. Температурний режим на випарній установці з головними випарними апаратами Роберта та хвостовою частиною з плівковими випарними апаратами.

Таблиця 2

Результати розрахунку температурного режиму випарних установок

Найменування	Розм.	По зн.	№ копусу випарної установки					
			3o	1	2	3	4	5
Випарена волога	%	W	9,78	27,34	25,58	10,74	5,64	3,87
Плівкова ВУ (темпер нагр. пари 130,5)								
Поверхні теплообм.	м ²	F	2430	3430	4580	2430	2430	2265
Т-ра вторинної пари	°С	t _{вт}	109	122	114,4	105,9	98,5	89
Питоме навантаження	кг/м ² год	u	14,25	28,2	19,6	15,65	8,22	6,05
Коеф.теплоперед.	Вт/м ² К	K	2178	2203	1914	1556	1245	860
ВУ з апаратами Роберта та 5 - плівковим (темпер нагр. пари 131,8)								
Поверхні теплообм.	м ²	F	3000	3000	6000	4800	6000	2265
Т-ра вторинної пари	°С	t _{вт}	107,5	122	114,1	105,6	95,2	85,6
Питоме навантаження	кг/м ² год	u	11,54	32,27	15,1	7,92	3,33	6,05
Коеф.теплоперед.	Вт/м ² К	K	1630	2156	1668	1086	650	860
ВУ з 1, 2 та 3o з апаратами Роберта та 3, 4, 5 - плівковими (темпер нагр. пари 131,8)								
Поверхні теплообм.	м ²	F	3000	3000	6000	2430	2430	2265
Т-ра вторинної пари	°С	t _{вт}	107,5	122	114,1	105,6	98,2	88,7
Питоме навантаження	кг/м ² год	u	11,54	32,27	15,1	15,65	8,22	6,05
Коеф.теплоперед.	Вт/м ² К	K	1630	2156	1668	1556	1245	860

Питома поверхня плівкової ВУ складає 206,6 м²/10 тонн за добу. Питома поверхня ВУ з апаратами Роберта та останнім плівковим - 295 м²/10 тонн за добу. Питома поверхня ВУ з 1, 2 та 3о з апаратами Роберта та 3, 4, 5 плівковим - 225 м²/10 тонн за добу.

У випарних апаратів Роберта в області високих концентрацій стрімко падає інтенсивність тепловіддачі при кипінні. Збільшення поверхні теплообміну за тієї ж різниці температур призводить до падіння питомого теплового навантаження, а, відповідно, і інтенсивності кипіння, що ще більше “завалює” коефіцієнт тепловіддачі при кипінні. Коефіцієнт теплопередачі для 4 корпусу ВУ майже у 2 рази більший у плівковому випарному апараті у порівнянні з апаратом Роберта, а для 5 корпусу - 3 рази. Крім того, в апаратах Роберта зі зменшенням теплового потоку для забезпечення сприятливих умов циркуляції необхідно збільшувати п'єзометричний рівень, що створює додаткову гідростатичну температурну депресію і, як наслідок, падіння корисної різниці температур. Плівкові випарні апарати не мають гідростатичної депресії, тому на хвостовій частині ВУ можна досягти підвищеного температурного режиму, що неможливо здійснити за допомогою апаратів Роберта.

Розрахунки інтенсивності тепловіддачі до киплячих цукрових розчинів в апаратах Роберта виконано за співвідношенням Н.Ю.Тобілевича.

Інтенсивність тепловіддачі до гравітаційно-стікаючих цукрових розчинів, концентрацією до 72% для довільного випарного апарата розрахована за отриманим на кафедрі ТЕХТ НУХТ рівнянням по тепловіддачі до плівок, що випаровуються:

$$Nu = 1,1 Re^{-\frac{1}{3}} \frac{0,85 + 0,01 Pe^{0,2} + 4,5 \cdot 10^{-4} Pe^{0,86} Pr^{-0,2}}{\exp(-1,2 \cdot 10^{-5} Re_n)} K_i \left(\frac{L}{L_o} \right)^{0,1}, \quad (1)$$

$$\text{де } Nu = \frac{\alpha}{\lambda} \left(\frac{v^2}{g} \right)^{\frac{1}{3}}; \quad Pe = \frac{4\Gamma_v}{a}; \quad Pr = \frac{v}{a}; \quad Re = \frac{4\Gamma_v}{v}; \quad Re_n = \frac{u d \rho_n}{\mu_n} - \text{числа Нуссельта,}$$

Прандтля, Пекле, Рейнольдса рідини та пари, відповідно; λ, a, v - теплопровідність, температуропровідність та кінематична в'язкість рідини, відповідно; g -

прискорення вільного падіння; μ_n - в'язкість пари; u - швидкість пари; Γ_v - об'ємна щільність зрошення, м²/с; L - довжини труби; $L_o = 1,5$ м.

Перехід до поверхневого кипіння здійснюється у випадку перевищення температурного напору між температурою стінки труби і парового ядра більше за Δt_{min} , а ефект інтенсифікації теплообміну в діапазоні $\Delta t \geq \Delta t_{min}$, внаслідок виникнення поверхневого кипіння, враховується множником:

$$K_t = 1 + 0,4 \left(\frac{\Delta t - \Delta t_{min}}{\Delta t_{min}} \right)^{1,2} \quad (2)$$

Якщо температурний напір не перевищує граничного значення - $\Delta t \leq \Delta t_{min}$, величина $K_t = 1$.

Параметром, що вказує на початок утворення парових бульбашок, прийнято критичне перегрівання стінки відносно температури насичення Δt_{min} для поверхні теплообміну, стан якої характеризується розміром шорсткості R_c

$$\Delta t_{min} = \frac{2\sigma T_n}{r\rho_n R_c} + \Delta\Phi_x, \quad (3)$$

де σ , r – поверхневий натяг та теплота фазового перетворення, відповідно; T_n – температура насичення; $\Delta\Phi_x$ – фізико-хімічна температурна депресія.

Аналіз даних початку кипіння води та цукрових розчинів в плівці показує, що відповідність досягається при використанні рзмірів мікротріщин $R_c = 0,5 \cdot 10^{-5}$ м – шорсткості нових теплообмінних труб.

За коефіцієнт тепловіддачі прийнято відношення теплового потоку до різниці температур між стінкою та середньомасовою температурою плівки.

В процесі аналізу дослідних даних з теплообміну при концентруванні сиропів в плівках виявилось, що зі зростанням швидкості парового потоку мало місце падіння середньої температури плівки нижче температури фізико-хімічної депресії, незважаючи на те, що з поверхні плівки відбувалося випаровування води.

Оскільки співвідношення (1) отримано з використанням, як визначальної, середньомасової температури плівки, температурний напір слід розраховувати як

$$\Delta t = t_{cm} - t_{em} - \Delta \Phi x + F_t \quad , \quad (4)$$

де F_t - функція корекції температурного напору; t_{em} - температура парового ядра потоку; t_{cm} - температура стінки з боку киплячого розчину.

Співвідношення для F_t має вигляд:

$$F_t = \Delta \Phi x \left[1 - \exp \left(-0,014 \cdot \frac{\sqrt[3]{\frac{u^3 \Gamma_v}{g^2}}}{\sqrt{\frac{\sigma}{g \rho}}} \right) \right] . \quad (5)$$

Залежність для розрахунку фізико-хімічної депресії цукрових розчинів відома і має вигляд:

$$\Delta \Phi x = 0,0162 \frac{T^2}{r} \Delta_a , \quad (6)$$

де
$$\Delta_a = \frac{CP}{109,7 - 1,9 CP} \text{ при } CP < 37\% ,$$

$$\Delta_a = \frac{CP}{62,655 - 0,695 CP} \text{ при } 37 < CP < 77\% .$$

Тепловий потік за співвідношенням (1) при відомій наявній різниці температур між нагрівною та вторинною парою визначається наступним чином:

- задаються тепловим потоком і визначають температуру стінки з боку плівки

$$t_{cm} = t_{ep} - \frac{q}{\alpha_{\text{конд}}} - q \frac{\delta_{cm}}{\lambda_{cm}} ,$$

де $\alpha_{\text{конд}}$ - коефіцієнт тепловіддачі від нагрівної пари при конденсації на зовнішній поверхні труби; $\delta_{\text{ст}}$, $\lambda_{\text{ст}}$ - товщина стінки труби та її теплопровідність, відповідно; $t_{\text{сп}}$ - температура нагрівної пари;

- при відомій щільності зрошення на вході в трубу $\Gamma_{\text{в.вх}}$ визначають середню швидкість пари в трубі - $u = \frac{2qL}{d\rho_2 r}$ та середню щільність зрошення -

$$\Gamma_{\text{в.сп}} = \Gamma_{\text{в.вх}} - \frac{qL}{2r\rho}$$

- за співвідношенням (1) розраховують коефіцієнт тепловіддачі від стінки до плівки розчину α_2 ;

- за співвідношенням (4, 5, 6) розраховують температурний напір для плівки;

- розраховують тепловий потік як $q = \alpha_2 \Delta t$ і порівнюють з заданим.

Ітерація продовжується до рівності теплових потоків із заданою точністю.

ВИСНОВКИ:

1. Інтенсивність тепловіддачі до густих цукрових розчинів в режимі випаровування з гравітаційно-стікаючої плівки суттєво вища у порівнянні з режим випаровування за умови природної циркуляції в апаратах Роберта.

2. Досягнення підвищеного температурного режиму хвостової частини ВУ доцільно лише за умови застосування плівкових випарних апаратів.

Рецензент: С.М. Василенко, д.т.н., проф.