

Миронов А.М., к.техн.н., Ільченко М.В., к.техн.н.

## ТЕПЛОЕНЕРГЕТИЧНА ІНТЕГРАЦІЯ УСТАНОВКИ УПАРЮВАННЯ ВОДНИХ РОЗЧИНІВ НІТРАТУ НАТРІЮ

*Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»*

**Ключові слова:** інтеграція процесів, пінч-аналіз, рекуперація, складові криві, сіткова діаграма, випарна установка, нітрат натрію.

Початок ХХІ-го сторіччя поставив перед промисловістю низку складних питань щодо підвищення енергетичної ефективності виробничих процесів. Двадцять років, що минули, стали періодом докорінного переосмислення підходів до традиційних технологій й зміни уявлення про вичерпність звичних енергоресурсів та дали потужний поштовх до пошуку шляхів раціоналізації темпів використання останніх. Інженери усього світу звертають увагу суспільства на те, що людство надзвичайно близько підходить до межі вичерпання природних ресурсів: насамперед, ключових енергоносіїв – нафти та природнього газу. Для вітчизняної промисловості наявні тенденції ускладнюються недостатньою забезпеченістю власними ресурсами у необхідних підприємствах об'ємах та надзвичайно марнотратним підходом до господарювання у виробничій сфері. Залежність української економіки від імпорту паливно-енергетичних ресурсів з-за кордону диктує необхідність вдосконалення теплообмінних мереж сучасними способами [1, 2].

Якісна перебудова економіки у цілому та на конкретних підприємствах зокрема полягає у відмові від морально та технічно застарілого обладнання, а також у підвищенні енергоефективності окремих процесів. Політика енергозаощадження та оптимізації виробничих циклів перш за все повинна торкнутися хімічної, харчової та переробної галузей. Потенціал подібних заходів полягає у реконструкції підприємств, впровадженні нових технологій та устаткування, а також у застосуванні інтеграції процесів як інструменту зменшення питомої частки зовнішніх енергоносіїв у собівартості кінцевої продукції [3].

Процеси випарювання належать до низки базових у хімічній та харчовій промисловості. Це означає, що їхня енергетична ефективність є одним з пріоритетів для економіки. Оскільки випарні апарати здійснюють видалення вологи з речових у постійно діючих апаратах великої продуктивності, ці процеси вимагають суттєвих енерговитрат, пов'язаних з технологічно необхідним підігрівом та випаровуванням величезних мас. Незважаючи на те, що у відомих випарних установках багатокорпусної конструкції вже присутня певна ступінь рекуперації, технологію усе ще можливо піддати модернізації. Галузеві експерти давно говорять про те, що незатребуваними технологічними залишками можна користуватися як теплоносіями у побічних процесах, а теплоту продуктового сконцентрованого розчину, який зазвичай охолоджується, цілком можливо використати для інших цілей на виробництві [3, 4].

З середини 70-х років минулого сторіччя науковцям та промисловцям стає відомою інтеграції процесів. Серед низки подібних методів доволі швидко встиг особливо виділитися метод пінч-аналізу. Він дозволяє реконструювати існуючі та проектувати нові підприємства з оптимальними параметрами енергоспоживання та без втручання до власне виробничої складової. Синтез маловідходних та енергоощадних хіміко-технологічних систем зведений до зрозумілого алгоритму, який ще на початку обрахунків встановлює енергетичні цілі, а наприкінці дозволяє обирати з декількох альтернативних варіантів один, що якнайкраще співпадає з критеріями оптимальності для конкретної задачі. Важливою вимогою для масового застосування методу була його безумовність – незалежність від конкретного хімічного процесу, попереднього стану виробництва, а також знань проектувальника щодо особливостей технології виробництва [5–7].

Метою даної роботи є вдосконалення рекуперативного теплообміну на установці випарювання водних розчинів нітрату натрію шляхом використання прийомів пінч-аналізу, а також зменшення обсягів використання енергії зовнішніх теплоносіїв.

Задля формування уявлення про технологічний процес та наявні матеріальні потоки, необхідно вивчити технологічний регламент виробництва. Принципова схема трьохкорпусної прямопечійної випарної установки упарювання водних розчинів  $\text{NaNO}_3$ , яка складається з випарних апаратів з природною циркуляцією (зі співвісною камерою) та кипінням розчину у трубах зображена на рис. 1.

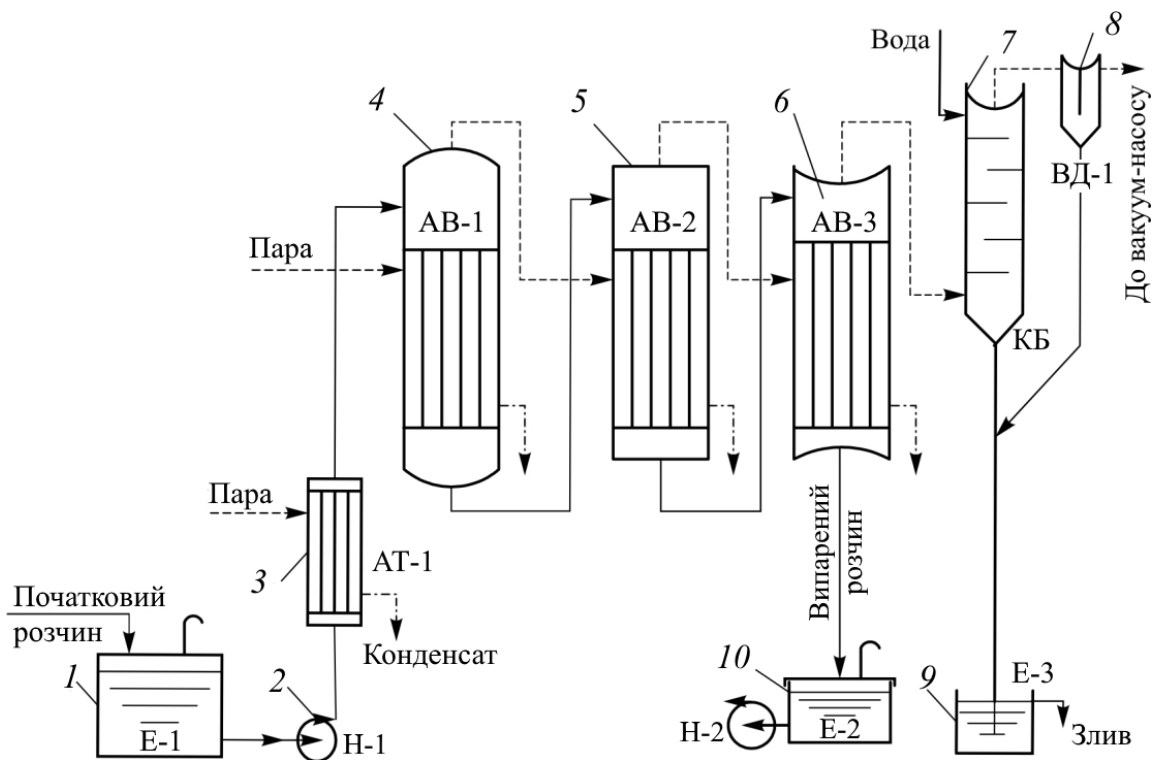


Рисунок 1 – Принципова схема установки упарювання водних розчинів нітрату натрію  
 1 – ємність початкового розчину Е-1; 2 – нагнітаючий насос Н-2;  
 3 – підігрівач початкового розчину АТ-1; 4–6 – випарні апарати АВ-1–АВ-3;  
 7 – барометричний конденсатор КБ; 8 – вологовідділювач ВД-1;  
 9 – барометричний стакан Е-3; 10 – збірник упареного розчину Е-2

Процес упарювання відбувається наступним чином. Початковий водний розчин  $\text{NaNO}_3$  з початковою температурою  $20^\circ\text{C}$  з ємності Е-1 нагнітається насосом Н-1 до трубного простору підігрівача розчину АТ-1. Тут розчин нагрівається водяною парою до температури кипіння ( $T=155^\circ\text{C}$ ) та направляється до першого корпусу АВ-1 випарної установки. У трубному просторі нижньої частини апарату розчин приймає тепло гріючої пари, що надходить в міжтрубний простір. Процес упарювання відбувається у киплячому за температури  $141^\circ\text{C}$  розчині, який піднімається у трубному просторі за рахунок енергії піднімаючих парів. Новоутворена суміш вторинних парів, інертних газів і розчину нітрату натрію піднімається у верхню частину випарного апарату, де пари звільнюються від рідини та надходять у міжтрубний простір другого корпусу АВ-2 випарної установки у якості гріючої пари. Рідка фаза самопливом зливається по зовнішній трубі у нижню частину випарного апарату. Після досягнення концентрації нітрату натрію у циркулюючому розчині  $4\%$  (контролюється за температурою кипіння  $T=141^\circ\text{C}$ ), він самопливом перетікає з верхньої частини АВ-1 у трубний простір АВ-2.

У трубному просторі нижньої частини апарату АВ-2 розчин приймає тепло вторинної пари від першого корпусу, процес упарювання відбувається у киплячому за температури  $109\text{--}141^\circ\text{C}$  розчині, аналогічно процесу, що відбувається у першому корпусі. Вторинна пара з другого корпусу надходить у міжтрубний простір третього корпусу АВ-3 випарної установки у якості гріючої пари. Після досягнення концентрації  $\text{NaNO}_3$  у циркулюючому у другому корпусі розчині  $6,4\%$  (контролюється за температурою кипіння  $T=109^\circ\text{C}$ ), він самопливом перетікає з верхньої частини АВ-2 у трубний простір АВ-3.

У трубному просторі нижньої частини апарату АВ-3 розчин приймає тепло вторинної пари від другого корпусу, процес упарювання відбувається у киплячому за температури  $71,4\text{--}109^\circ\text{C}$  розчині, аналогічно процесу, що відбувається у першому та другому корпусах, але на відміну від двох перших корпусів, розчин у третьому корпусі кипить під тиском нижче атмосферного. Вакуум у третьому корпусі створюється вакуум-насосом. Вода для всмоктування вакуум-насосом відділяється від інертних газів з установки у вологовідділювачі ВД-1. Після досягнення концентрації нітрату натрію у циркулюючому у третьому корпусі розчині  $18\%$  (контролюється за температурою кипіння  $T=71,4^\circ\text{C}$ ), він самопливом перетікає з верхньої частини АВ-3 до збірника готового розчину Е-2, звідки перекачується насосом Н-2 на подальшу переробку або упаковку за температури не вище  $32^\circ\text{C}$ .

Вторинна пара корпусу АВ-3 надходить до барометричного конденсатору КБ, де спочатку конденсується, а потім охолоджується за рахунок теплообміну з охолоджувальною водою до температури  $25^\circ\text{C}$ . Вода надходить зі свердловини з початковою температурою  $7^\circ\text{C}$ . Конденсат, що утворився, виводиться до каналізації через барометричний стакан Е-3. Температура води на виході з КБ становить  $57^\circ\text{C}$ .

Утворені після теплообмінників АТ-1, АВ-1, АВ-2 та АВ-3 конденсати гріючих пар з температурами  $20^\circ\text{C}$ ,  $52,6^\circ\text{C}$ ,  $47,8^\circ\text{C}$  та  $31^\circ\text{C}$ , відповідно, через охолоджувачі відводяться у виробничу лінію конденсату через конденсатовідвідники.

Спираючись на дані, екстраговані з опису технологічної схеми, а також низку теплофізичних характеристик потоків, складено таблицю поточкових даних, де вказано початкову  $T_S$  та цільову  $T_T$  температури потоків, їхні масові витрати  $G$ , теплоємності

речовин  $c$ , питому теплоту конденсації  $r$  (для потоку зі зміною фази), потокові теплоємності  $CP$  та зміни ентальпій  $\Delta H$  – таблиця 1.

Таблиця 1 – Потокові дані установки

№	Найменування потоку	Тип	$T_s$ , °C	$T_T$ , °C	$G$ , кг/с	$c$ , кДж/кг·К	$r$ , кДж/кг	$CP$ , кВт/°C	$\Delta H$ , кВт
1	Конденсат 1 корп.	гар.	169,6	52,6	3,20	4,19	–	13,41	1568,74
2	Конденсат 2 корп.	гар.	153,8	47,8	2,70	3,993	–	10,78	1142,80
3	Конденсат 3 корп.	гар.	107	31	1,90	3,894	–	7,40	562,29
4а	Вторинна пара 3 корп. (конд.)	гар.	60,7	60,7	2,07	–	2178,15	–	4508,77
4б	Вторинна пара 3 корп. (охол.)	гар.	60,7	25	2,07	3,454	–	7,15	255,25
5	Упарений розчин	гар.	71,4	32	1,11	3,105	–	3,45	135,79
6	Початковий розчин	хол.	20	155	7,78	4,033	–	31,38	4235,86
7	Вода в КБ	хол.	7	57	22,74	4,19	–	95,28	4764,03

Сукупна зміна ентальпій за гарячими потоками становить 8173,64 кВт, а за холодними потоками – 8999,89 кВт. Величина рекуперації, яка наразі існує у теплообмінній мережі, складає 4764,02 кВт. Інформації, наведеної у таблиці 1, достатньо для початку розрахунків з пінч-інтеграції теплообмінної мережі установки упарювання водних розчинів  $\text{NaNO}_3$  [8, 9].

Спочатку зобразимо наявну рекуперацію за допомогою інструменту складових кривих – рис. 2.

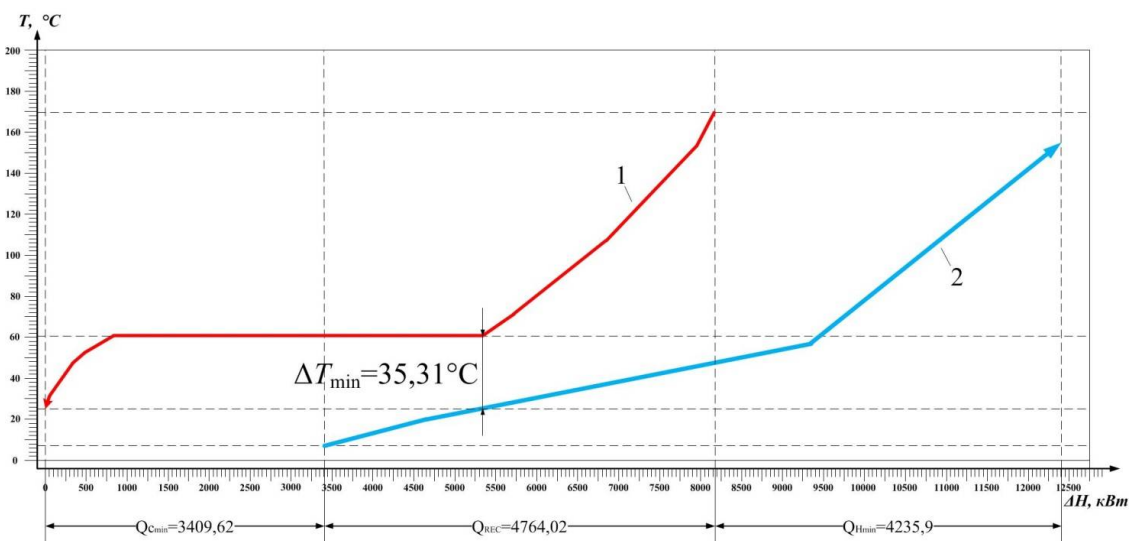


Рисунок 2 – Спільне зображення гарячої та холодної складових кривих для існуючого процесу  
1 – гаряча складова крива; 2 – холодна складова крива

З рисунку 2 видно, що у процесі присутня енергія холодних утиліт  $Q_C$  величиною 3409,62 кВт та енергія гарячих утиліт  $Q_H$ , яка становить 4232,9 кВт. При цьому мінімальна різниця температур  $\Delta T_{\min}$  у області пінчу складає 35,31 °С.

Очевидно, що вказане значення  $\Delta T_{\min}$  є далеким від оптимального: у системі наявний потенціал енергозбереження, задіяння якого потягне за собою збільшення рекуперації та зменшення енергії сторонніх теплоносіїв. Щоб досягти потрібних цільових енергетичних значень, слід зменшити  $\Delta T_{\min}$  та змінити структуру системи теплообміну установки випарювання [10, 11].

Нове значення мінімальної різниці температур  $\Delta T_{\min} = 10$  °С визначене за допомогою програмного забезпечення «PINCH» [12]. Для цієї нової величини складові криві процесу матимуть вигляд як на рис. 3.

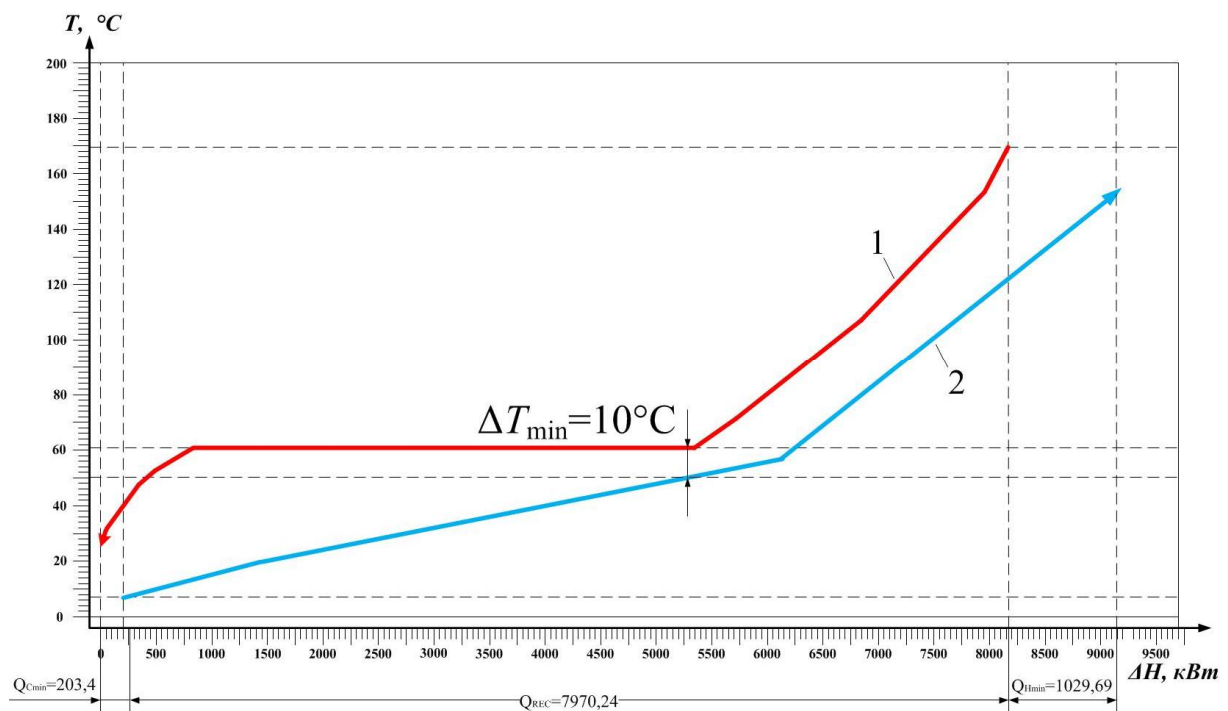


Рисунок 3 – Спільне зображення гарячої та холодної складових кривих для  $\Delta T_{\min} = 10$  °С  
1 – гаряча складова крива; 2 – холодна складова крива;  $Q_{C\min}$  та  $Q_{H\min}$  – споживання потужності гарячих утиліт та холодних утиліт, відповідно

Рисунок 3 демонструє збільшення потужності рекуперації  $Q_{rec}$  до 7970,24 кВт, а також зменшення утиліт  $Q_{C\min}$  та  $Q_{H\min}$  до 203,4 кВт та 1029,69 кВт, відповідно. Пінч при цьому локалізується на температурах 60,7 °С та 50,7 °С.

Наявна інформація дозволяє починати розміщення рекуперативних та утилітних теплообмінників на сітковій діаграмі. Дотримуючись усіх принципів пінч-аналізу, виконуючи необхідні розщеплення потоків за  $N$ - та  $CP$ -правилами та виключаючи переніс теплової енергії через лінію пінча [5, 6, 13] було побудовано сіткову діаграму інтегрованого процесу – рис. 4. На ній схематично зображена вдосконалена система теплообмінників, у тому числі дев'ять рекуперативних та чотири утилітних (2 нагрівача та 2 охолоджувача).

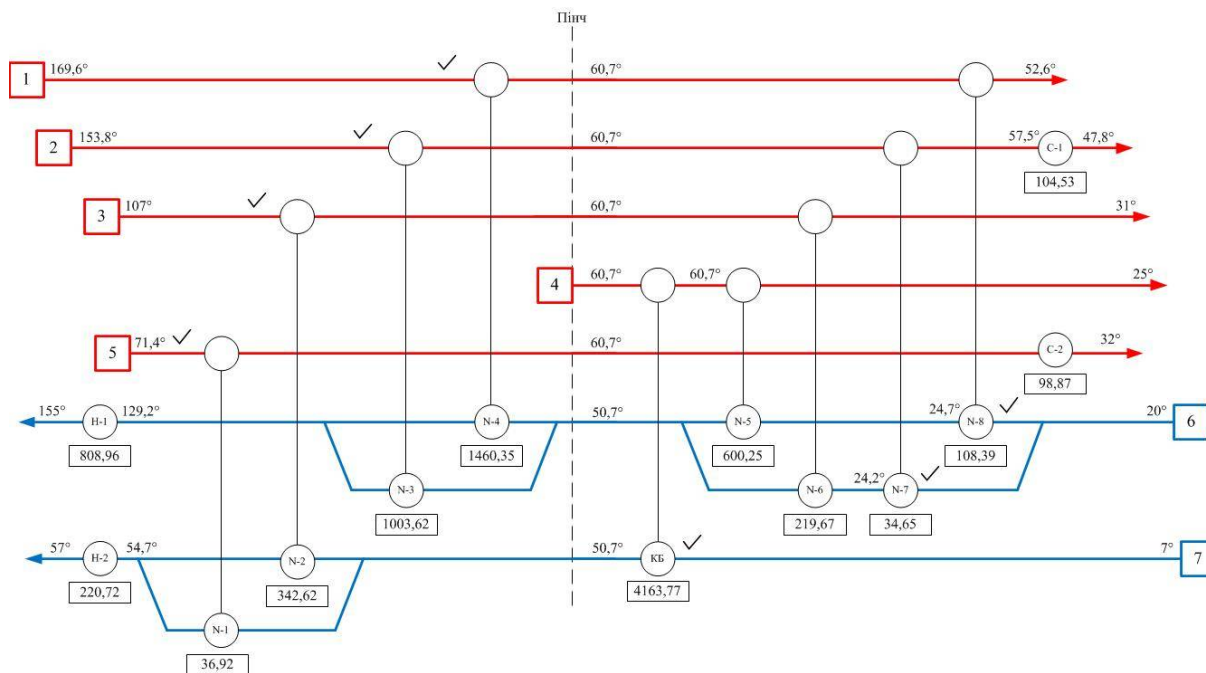


Рисунок 4 – Сіткова діаграма інтегрованого процесу  
 1–5 – гарячі потоки; 6 – 7 – холодні потоки; N-1–N-8 – теплообмінники;  
 H-1–H-2 – нагрівачі; C-1–C-2 – охолоджувачі

Порівняти енергетичні характеристики установки до та після впровадження заходів з інтеграції процесів можна за допомогою таблиці 2.

Таблиця 2 – Порівняння енергетичних характеристик існуючої та інтегрованої теплообмінних мереж установки випарювання водних розчинів нітрату натрію

Технологічна схема	Гарячі утиліти, кВт	Холодні утиліти, кВт	Рекуперація, кВт
Існуюча	4235,90	3409,62	4764,02
Інтегрована	1029,69	203,40	7970,24

Базуючись на результатах розрахунків, спроектовано нову принципову схему теплообмінної мережі установки випарювання водних розчинів нітрату натрію – рис. 5.

### Висновки

Розглянута у роботі установка випарювання водних розчинів нітрату натрію має великий потенціал енергозбереження, що підкріплюється графічним зображенням складових кривих процесу. Застосування методів пінч-аналізу та скорочення мінімальної різниці температур процесу з 35,31 °C до 10 °C здатне забезпечити підвищення рекуперації теплової енергії у процесі на 67,5 %, а також зменшення енергії зовнішніх теплоносіїв на ту ж саму величину. Поставлені цілі досягаються за рахунок встановлення 8 нових рекуперативних теплообмінників, 4 утилітних та використання штатного баро-

метричного конденсатору системи у якості додаткового рекуперативного теплообмінного апарату.

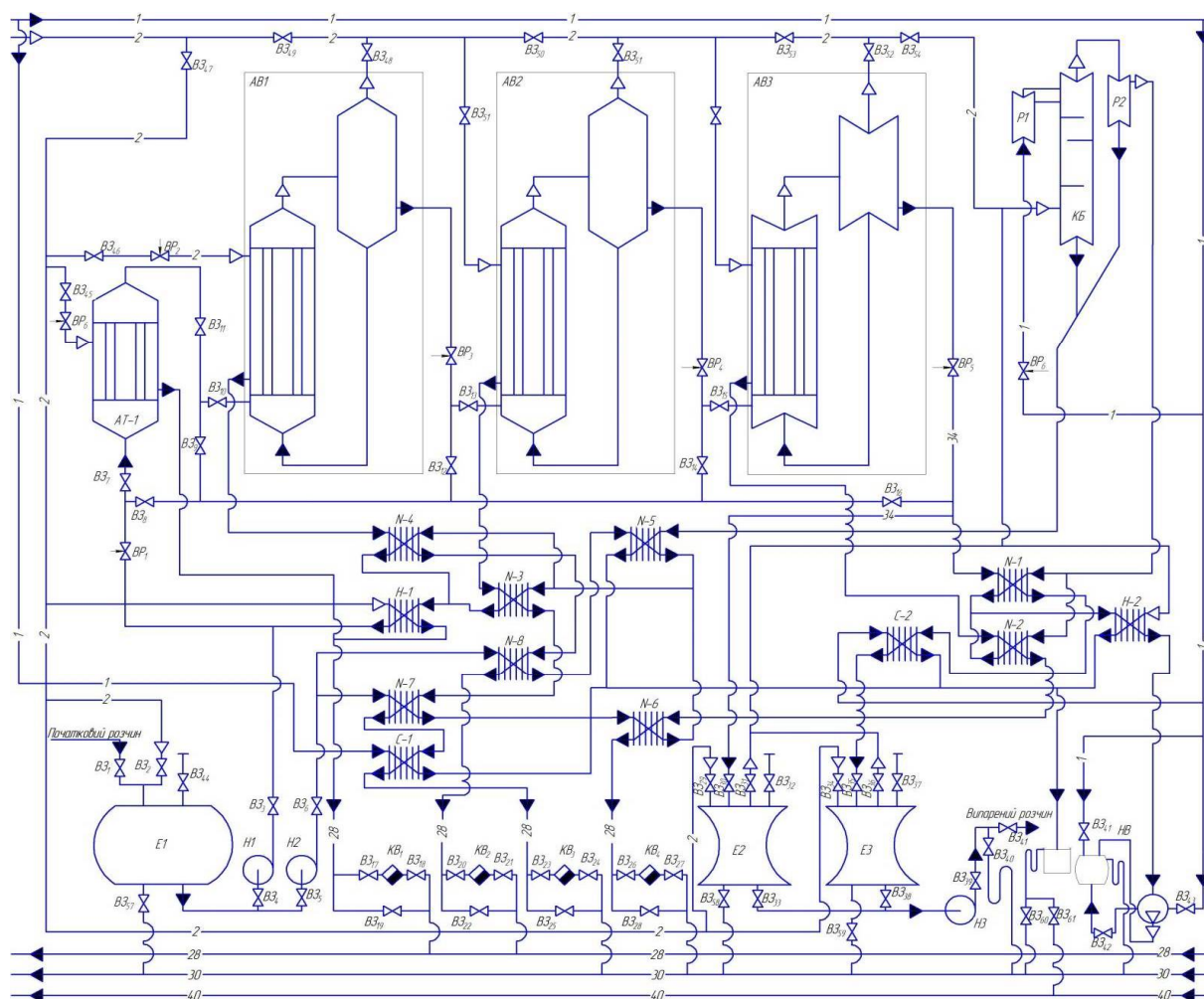


Рисунок 5 – Принципова технологічна схема проекту інтеграції системи теплообміну установки випарювання водних розчинів нітрату натрію

### Література

1. Global energy transformation: A roadmap to 2050 (2019 edition), International Renewable Energy Agency. – Abu Dhabi: IRENA, 2019. – 52 p.
2. Renewable Energy: A Global Review of Technologies, Policies and Markets / Edited by D. Aßmann, U. Laumanns and D. Uh – UK-US: Earthscan (Taylor & Francis), 2006. – 320 p.
3. Tovazhyansky L.L. Application of process integration for energy saving and pollution reduction in Ukraine / L.L. Tovazhyansky, P.A. Kapustenko, L.M. Uliev et al. // Budapest: PRES'99 Proceedings, ed. by F. Friedler and J. Klemes (Hungarian Chemical Society) – 1999. – PP. 659–664.
4. Morgan S. Use process integration to improve process designs and the design process / S. Morgan // Chemical engineering progress – 1992. – № 9. – P. 62–68.

5. Linnhoff B. Synthesis of heat exchanger networks: Part I. Systematic generation of energy optimal networks / B. Linnhoff, J. R. Flower // American Institute of Chemical Engineers Journal (AIChE Journal), 1978. – № 24 (4). – PP. 633–642.
6. Linnhoff B. Synthesis of heat exchanger networks: Part II: Evolutionary generation of networks with various criteria of optimality / B. Linnhoff B., J. R. Flower // American Institute of Chemical Engineers Journal (AIChE Journal), 1978. – № 24 (4). – PP. 642–654.
7. Rodera N. A methodology for improving heat exchanger network operation / N. Rodera, D. L. Westphalen, H. K. Shethna // Applied thermal engineering – 2003. – № 23. – PP. 1729–1741.
8. Gundersen T. The synthesis of cost optimal heat exchanger networks. An industrial review of the state of the art / T. Gundersen, L. Naess // Computer & Chemical Engineering – 1988. – № 12(6). – PP. 503–530.
9. Kapustenko P.O. Integration processes of benzene-toluene-xylene fraction, hydrogenation, hydrodesulphurization and hydrothermoprocessing on installation of benzene unit / P.O. Kapustenko, L.M. Ulyev, M.V. Ilchenko, O.P. Arsenyeva // Chemical Engineering Transactions – 2015. – Vol. 45. – PP. 235–240.
10. Moodley A. Development of a unified mass and heat integration framework for sustainable design. An automated approach / A. Moodley, T. Majozi // Chemical Engineering Transactions – 2005. – № 7. – PP. 465–470.
11. Taal M. Cost estimation and energy price forecasts for economic evaluation of retrofit projects / M. Taal, I. Bulatov, J. Klemes et al. // Applied Thermal Engineering – 2003. – № 23. – PP. 1819–1835.
12. PINCH Software, version 2.02. CESIT, NTU “KhPI”, Ukraine, Kharkiv: NTU “KhPI”, 2002. Available at: <http://www.sodr-t.kharkiv.com> (accessed 06.01.2020).
13. Klemes J. Total Sites integrating renewables with extended heat transfer and recovery / J. Klemes, P. Varbanov // Heat Transfer Engineering – 2010. – № 31(9). – PP. 733–741.

УДК 66.045.12

Миронов А.М., Ільченко М.В.

### **ТЕПЛОЕНЕРГЕТИЧНА ІНТЕГРАЦІЯ УСТАНОВКИ УПАРЮВАННЯ ВОДНИХ РОЗЧИНІВ НІТРАТУ НАТРІЮ**

Роботу присвячено вивченню можливості модернізації теплообмінної мережі установки упарювання водних розчинів нітрату натрію шляхом використання засобів інтеграції процесів. Мета роботи полягає у збільшенні величини рекуперації теплової енергії у хіміко-технологічній системі та зменшенні частки сторонніх утиліт у загальній структурі енергоспоживання підприємства, що розглядається. Поставлені задачі досягаються за рахунок застосування проектувальних та розрахункових методів пінч-аналізу як однієї з базових методологій інтеграції процесів. Найбільш важливим результатом роботи є розрахунково доведена можливість збільшення рекуперації енергії на 3,2 МВт, а також зниження потужності зовнішніх теплоносіїв на ту саму величину.



Значимість отриманих результатів полягає у тому, що синтезовані при розрахунках схеми теплообмінних мереж можуть бути використані при проектуванні або реконструкції аналогічних установок упарювання водних розчинів нітрату натрію та інших хімічно подібних речовин. Окрім того, викладені принципи можуть бути адаптовані спеціалістами різних промислових підприємств задля модернізації інших виробничих установок та суттєвого зниження витрат на функціонування хіміко-технологічних систем. У якості основного розрахункового методу в роботі використано пінч-аналіз. Доступний потенціал енергозбереження схеми оцінено за допомогою інструмента складових кривих процесу. Встановлено, що рекуперация у існуючому процесі складає приблизно 4,76 МВт, а мінімальна різниця температур у системі дорівнює 35,31 °С. За допомогою програмного забезпечення «PINCH» визначено нове оптимальне значення мінімальної різниці температур, яке становить 10 °С. Для встановленої величини побудовано сіткову діаграму процесу та принципову схему проекту інтеграції теплообмінної мережі. Запропонована схема здатна забезпечити збільшення рекуперации тепла та зменшення теплової енергії зовнішніх утиліт процесу на 67,5 %. Вказані проектні показники досягаються за рахунок використання комплексу з дев'яти рекуперативних та чотирьох утилітних теплообмінників.

**Ключові слова:** інтеграція процесів, пінч-аналіз, рекуперация, складові криві, сіткова діаграма, випарна установка, нітрат натрію.

Миронов А.Н., Ильченко М.В.

## **ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ИНТЕГРАЦИЯ УСТАНОВКИ УПАРИВАНИЯ ВОДНЫХ РАСТВОРОВ НИТРАТА НАТРИЯ**

Работа посвящена изучению возможности модернизации теплообменной сети установки упаривания водных растворов нитрата натрия путём использования средств интеграции процессов. Цель работы состоит в повышении величины рекуперации тепловой энергии в химико-технологической системе и снижении доли сторонних утилит в общей структуре энергопотребления рассматриваемого предприятия. Поставленные задачи достигаются за счёт применения проектных и расчётных методов пинч-анализа как одной из базовых методологий интеграции процессов. Наиболее важным результатом работы является расчётно доказанная возможность увеличения рекуперации энергии на 3,2 МВт, а также уменьшения мощности внешних теплоносителей на ту же величину. Значимость полученных результатов заключается в том, что синтезированные при расчётах схемы теплообменных сетей могут быть использованы при проектировании или реконструкции аналогичных установок упаривания водных растворов нитрата натрия и других химически подобных веществ. Кроме того, изложенные принципы могут быть адаптированы специалистами разных промышленных предприятий для модернизации других производственных установок и существенного снижения затрат на функционирование химико-технологических систем. В качестве основного расчётного метода в работе использован пинч-анализ. Доступный потенциал энергосбережения схемы оценён при помощи инструмента составных кривых процесса. Установлено, что

рекуперация в существующем процессе составляет примерно 4,76 МВт, а минимальная разница температур в системе равна 35,31 °С. При помощи программного обеспечения «PINCH» определено новое оптимальное значение минимальной разницы температур, которое составляет 10 °С. Для установленной величины построена сеточная диаграмма процесса и принципиальная схема проекта интеграции теплообменной сети. Предложенная схема способна обеспечить увеличение рекуперации тепла и уменьшение тепловой энергии внешних утилит процесса на 67,5 % от исходного значения. Указанные проектные показатели достигаются за счёт использования комплекта из девяти рекуперативных и четырёх утилитных теплообменников.

**Ключевые слова:** интеграция процессов, пинч-анализ, рекуперация, составные кривые, сеточная диаграмма, выпарная установка, нитрат натрия.

Myronov A.M., Ilchenko M.V.

### **HEAT AND ENERGY INTEGRATION OF SODIUM NITRATE AQUEOUS SOLUTIONS EVAPORATION UNIT**

The work is devoted to investigation of possibility of the heat exchange network for sodium nitrate aqueous solutions evaporation unit modernization by means of process integration. The purpose of the work is to increase the amount of heat recovery in the chemical-technological system and to reduce the share of third-party utilities in the overall structure of energy consumption at the company under consideration. The tasks are achieved by design and calculation methods of pinch analysis, which is one of the basic methodologies for process integration. The most important result of the work is the calculatedly proven possibility of energy recovery increasing by 3.2 MW, as well as reducing the capacity of external heat carriers by the same amount. The significance of the obtained results lies in the fact that the heat exchanger network circuits synthesized during the calculations can be used in the design or reconstruction of similar installations of sodium nitrate aqueous solutions evaporation units or other chemically similar substances. In addition, the stated principles can be adapted by specialists of various industrial enterprises for the modernization of other production facilities and significant reduction of the cost for functioning of chemical-technological systems. Pinch analysis is used as the main method of calculation. The available energy saving potential of the circuit is estimated using the process component curves tool. It is established that the recuperation in the existing process is approximately 4.76 MW, and the minimum temperature difference in the system is 35.31 °C. With PINCH software, a new optimal value of the minimum temperature difference of 10°C has been determined. A grid diagram of the process and a concept scheme of the heat exchanger network integration project is constructed for the obtained value. The proposed scheme is capable to increase a heat recovery and reduce a thermal energy of external process utilities by 67.5 %. These design targets are achieved using a set of nine recuperative and four utility heat exchangers.

**Keywords:** process integration, pinch analysis, recuperation, component curves, grid diagram, evaporation unit, sodium nitrate.