

## ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ ПІНЧ-ТЕХНОЛОГІЙ В ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННІ НА ПІДПРИЄМСТВАХ ХАРЧОВОЇ ГАЛУЗІ

Л. Г. Рожкова, к.т.н., доцент  
О. В. Радчук, к.т.н., доцент  
М. Ю. Савченко-Перерва, к.т.н., доцент  
Сумський національний аграрний університет

*Стаття присвячена перспективам застосування пінч-аналізу в харчовій галузі. Розглянуто методологію застосування пінч-аналізу в світовій практиці і стосовно до процесів переробки харчових продуктів. Оскільки пінч-аналіз - методологія мінімізації енергоспоживання технологічного процесу шляхом розрахунку, обґрунтованого з точки зору термодинаміки обсягу енергоспоживання, то впровадження пінч-технологій дуже перспективно при енергозбереженні в харчовій галузі.*

**Ключові слова:** енергозбереження, енергоефективність, регенерація тепла, пінч-аналіз, фінансова економія, теплообмінники, реконструкція, проектування, оптимізація.

**Постановка проблеми у загальному вигляді.** Відомо, що енергозбереження передбачає реалізацію правових, організаційних, наукових, виробничих, технічних та економічних засобів, спрямованих на ефективне, раціональне використання та економію витрат паливно-енергетичних ресурсів. Мотивації для розвитку та застосування енергозберігаючих технологій достатньо вагомі: фінансова економія та планетарна безпека.

Зараз питання енергозбереження набувають все більшої актуальності, особливо у галузях промисловості, що споживають багато тепла. Безумовно, до таких відноситься і харчова галузь. Відомі основні методи оптимізації енергоспоживання:

- експлуатаційні вдосконалення, що обумовлюють оптимізацію технологічних процесів;

- збільшення відсотків регенерації тепла;

- впровадження нових технологій, що забезпечують енергоефективність обладнання.

**Аналіз результатів досліджень та публікацій.** Аналіз інформаційних даних показує, що найбільш ефективним для оптимізації енергоспоживання є збільшення відсотка регенерації тепла. Ця мета може бути досягнута за рахунок підвищення так званої теплової інтеграції. При цьому удосконалення регенерації тепла безпосередньо пов'язано з оптимізацією та реконструкцією теплообмінних систем. Важливим завданням при цьому є вибір з безлічі альтернатив оптимального варіанту, що повинен бути пов'язаним з найменшими витратами на додаткову площу поверхні теплообміну і на структурні зміни мережі. У сучасних методах реконструкції теплообмінних систем застосовуються або методи математичного програмування або пінч-аналіз (пінч-метод).

При застосуванні методів математичного програмування задача проектування оптимальної теплообмінної системи формулюється як завдання нелінійного математичного

програмування, що складається з набору рівнянь та обмежень. Основна перевага даного методу - можливість автоматизації розрахунків. Основний недолік - обмежені можливості активної участі проектанта та необхідність у деяких істотних спрощеннях при оцінці вартості.

Що стосується пінч-аналізу, то це методологія мінімізації енергоспоживання технологічного процесу шляхом розрахунку обґрунтованого з точки зору термодинаміки об'єму споживання енергії. Досягнення цій мети можливо за допомогою оптимізації теплообміну між процесами, режимами технологічних процесів, а також вибором видів енергозабезпечення. Друга назва цього методу - інтеграція теплових процесів.

При використанні пінч-методу процедура реконструкції або проектування виробництва складається з двох етапів:

- етап визначення цільових значень (тобто додаткових енергетичних витрат);

- етап реконструкції (або проектування).

Основною перевагою використання пінч-методу є інтерактивний характер процедури реконструкції (проектування). До недоліків слід віднести тривалі етапи ручного розрахунку, а також ймовірність розробки надто складних варіантів проекту із-за неявного обліку критеріїв вартості при розрахунку.

Застосування вискоефективного методу інтеграції теплових процесів на основі аналізу (або пінч-методу), запропонованого та розвинутого професором Б. Линхоффом з співробітниками з Університету Манчестерського інституту науки і техніки дає в багатьох випадках унікальні результати при реконструкції та проектування тепломасообмінних мереж [1].

Так, по даним [2] споживання енергоресурсів може знизитися на 30 - 50%, а в ряді випадків по окремих установках до 70%. При цьому термін окупності проектів з реконструкції, розроблених з використанням пінч-аналізу, як правило, не перевищує двох років .

Пінч-метод базується на термодинамічному

аналізі систем теплових технологічних потоків, а економічна оптимізація спирається на співвідношення загальної річної вартості експлуатації проекту та найменшого температурного напору на теплообмінному обладнанні. Результатом застосування пінч-методу є істотна фінансова економія за рахунок мінімізації споживання зовнішніх енергоносіїв, як тих, що підводять енергію, так і тих, що відводять. Мінімізація використання зовнішніх енергоносіїв здійснюється шляхом досягнення максимально можливого відсотка рекуперації теплоти в рамках розглянутої енерготехнологічної системи. При цьому дана методика дозволяє мінімізувати площу теплообмінної поверхні і кількість теплообмінних одиниць, оптимізувати перепади тиску в мережі та розміщення силових установок, мінімізувати кількість стічних вод та викиди вуглекислого газу. У разі модернізації існуючих виробництв пінч-технології дозволяють максимально використовувати вже встановлене обладнання в нових робочих мережах, що знижує інвестиції в реконструкцію. Більше того, шляхом аналізу можна визначити ціновий компроміс між усіма названими факторами та капітальними вкладеннями за запланованим терміном окупності, який і повинен забезпечити проект, що розробляється [3].

Невід'ємною частиною пінч-аналізу є дві важливих властивості. Перша важлива властивість - це можливість встановлення цілей проектування перед початком самого проектування. Другим є можливість інтегрування процесів в межах великого виробничо-територіального комплексу. В результаті стає можливим підготовка інвестиційних планів, визначення цільових значень (витрат) енергоспоживання і зниження емісії шкідливих речовин, як для існуючих процесів, так і для тих, що проектуються.

Зазвичай виконання пінч-аналізу на промисловій установці проводять в наступній послідовності [3]:

1. Вибірка необхідних вихідних даних (Data Extraction).
2. Завдання цілей (Targeting).
3. Проектування (Design).
4. Оптимізація (Optimization), де початкова технологічна система економічно вдосконалюється.

На початку роботи складається таблиця вихідних розрахункових даних. Далі за вихідними даними будуються графіки гарячих і холодних теплових потоків в координатах «ентальпія - температура»: спочатку для індивідуальних апаратів і потоків, потім потоки додаються (інтегруються), рис. 1.

Точка найбільшого зближення отриманих кривих - це найменший пе-репад температур при

виборі схеми між потокового теплообміну, тобто вузьке лімітуюче місце, назване «пінчем» (пінч означає пережим). Потім виконується аналіз цих результатів:

- з використанням графіків встановлюється залежність гарячих і холодних енергетичних витрат для гарячих і холодних утиліт від величини різниці температур гарячої та холодної складових кривих в точці пінча; при цьому слід зазначити, що існують і інші способи завдання енергетичних цілей [4,5];

- виконується проектування теплообмінної мережі, розміщення теплообмінників і утиліт, спрощення теплової мережі;

- проводиться аналіз роботи систем з комбінованою виробленням теплоти і електричної енергії (паровий або газової турбіни, теплового насоса, холодильних циклів (при наявності таких));

- при необхідності змінюються параметри технологічного процесу (зокрема, в реакторах, ректифікаційних колонах, випарниках, сушарках тощо) з метою збільшення енергозбереження.



Рис. 1. Визначення цільових значень (витрат) енергоспоживання за складовими кривими

Пінч-аналіз може застосовуватися як при проектуванні нового виробництва, так і при реконструкції існуючої установки [6]. При цьому, безумовно, існують особливості і обмеження при виборі енергетичних цілей, розміщенні теплообмінників, поділі потоків і т.д.

**Мета статті** - аналіз перспектив застосування пінч - методу в енергозбереженні в харчовій промисловості.

**Виклад основного матеріалу.** Для діючих підприємств харчової галузі, особливо для тих, де обладнання експлуатується досить давно, впровадження пінч-технології дозволить досягти істотного зниження споживання енергоресурсів і, відповідно, фінансових платежів за них. Зниження споживання енергоресурсів може досягати 35% загальної енергії з терміном окупності проектів з реконструкції 1 - 2 роки [2]. Методологія пінч-методу в харчовій галузі може базуватися на загальних принципах його

застосування. Відомо, що в світовій практиці рекомендується такі етапи методології пінч-аналізу [3]:

- будь-який процес, що оптимізується, розглядається як сукупність гарячих і холодних потоків. Гарячими називаються потоки, які потребують охолодження, а холодними - потоки, які потребують нагрівання;

- виконується побудова графіків гарячих і холодних потоків в координатах «ентальпія-температура»;

- виконується побудова графіків, що представляють сукупність гарячих і сукупність холодних потоків в таких же координатах;

- проводиться аналіз отриманих результатів.

У технологічних процесах переробки харчових продуктів теплові режими застосовуються широко, отже, споживається багато теплової енергії, а також холоду. Наприклад, для процесів пастеризації чи стерилізації молока підводиться гарячий теплоносій (гарячий потік), який в результаті охолоджується. Молоко в даному випадку є холодним потоком, який необхідно нагріти. З іншого боку, пастеризоване або стерилізоване молоко повинно бути охолоджене перед наступним етапом переробки і в цьому процесі молоко - гарячий потік. Для кожного теплового процесу на діаграмі «ентальпія-температура» можуть бути побудовані графіки теплових потоків: гарячих і холодних. Потім для процесу, що розглядається, будуються такі графіки:

- перший, який представляє сукупність всіх гарячих потоків;

- другий, що представляє сукупність всіх холодних потоків.

Ці графіки називаються відповідно гарячої і холодної складовими кривими. На рис.2 показаний умовний приклад побудови двох гарячих потоків (теплоносіїв) для двох теплообмінників на діаграмі «ентальпія-температура».

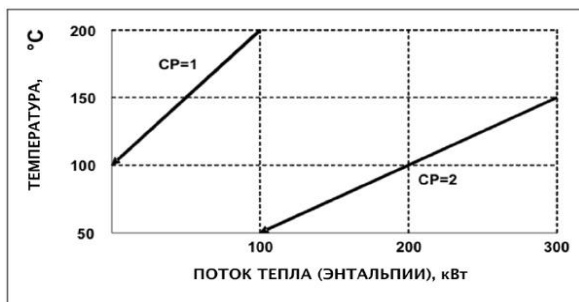


Рис.2. Діаграма «ентальпія-температура» для гарячих потоків.

Потік 1 охолоджується з 200 до 100 ° С. Його потіковий тепловміст  $C \cdot M$ , (тобто для рідкого теплоносія добуток питомої теплоємності теплоносія  $C$  на його масову витрату  $M$ , а для водяної пари добуток  $r \cdot M$ , де  $r$  - прихована

теплота пароутворення) умовно прийнята рівною 1; тому від потоку відводиться 100 кВт (кДж/с) тепла. Потік 2 охолоджується з 150 до 50°C. Тепловміст  $C \cdot M$  даного потоку умовно дорівнює 2; отже, від потоку відводиться 200 кВт тепла. Далі будується графік сумарної потреби в охолодженні (гаряча складова крива) методом простого додавання потреб у охолодженні для кожного діапазону температур, рис.3.



Рис.3. Графік сукупності двох гарячих потоків (так звана «гаряча складова крива»)

У результаті маємо:

- в діапазоні від 200 до 150 ° С існує тільки один потік, що має  $C \cdot M = 1$  і в цьому діапазоні температур необхідно відведення 50 кВт тепла;

- в діапазоні від 150 до 100 ° С існує два гарячих потоку з сумарним  $C \cdot M = 3$ . Загальна потреба у відведенні тепла в даному діапазоні складає 150 кВт. Складова крива на ділянці температур 150-100°C є більш похилою, оскільки сумарна величина  $C \cdot M$  в цьому діапазоні більше, ніж в діапазоні 200-150 ° С;

- в діапазоні від 100 до 50 ° С існує тільки один потік, що має  $C \cdot P = 2$ . У цьому діапазоні температур необхідно відведення 100 кВт тепла.

Графік сукупності холодних потоків (теплоносіїв) (тобто холодної складової кривою) будується аналогічним чином. На практиці кількість потоків в складі процесу, як правило, виявляється набагато більше двох. Зрозуміло, що принцип побудови аналогічних діаграм залишається незмінним. Потім гаряча і холодна складові криві будуються на одній і тій же діаграмі «ентальпія - температура». Ці криві представляють сукупні потреби процесу в охолодженні і нагріванні, рис.4. Проекції кривих на вісь ентальпії перекриваються. Область перекриття проекцій двох кривих на ось ентальпії визначає можливість для передачі тепла між процесами (тобто рекуперації тепла). Однак у кожній з складових кривих існує ділянка, проекція якого на ось ентальпії не перекривається проекцією другої кривої.

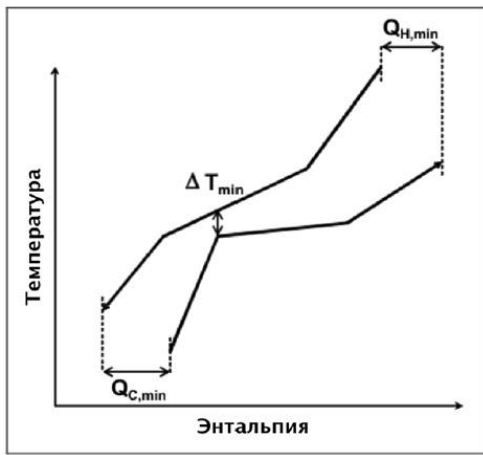


Рис.4. Криві сукупної потреби процесів в охолодженні і нагріванні

Це означає, що в своїй верхній частині холодна складова крива потребує підведення тепла від зовнішнього джерела (потужністю  $Q_{H, \min}$ ), а гаряча складова крива в своїй нижній частині потребує зовнішнього джерела охолодження (потужністю  $Q_{C, \min}$ ).

$Q_{H, \min}$  і  $Q_{C, \min}$  є мінімальними теоретичними потребами в додаткових енергоресурсах. Сумарним графіком кривих сукупної потреби процесів в охолодженні і нагріванні визначається точка на осі абсцис (ентальпія), в якій відстань між кривими по осі температури є мінімальною, тобто це пінч, і в точці пінча різниця температур між кривими досягає мінімуму -  $\Delta T_{\min}$ .

Після того, як для процесу визначені пінч і теоретичні потреби в енергоресурсах, для оптимізації процесу можуть бути використані три основних («золотих») правила пінч-аналізу [2]. Процес може бути розглянутий як дві окремі системи, що знаходяться відповідно вище пінча і нижче пінча, рис.5.



Рис.5. Системи процесса, що оптимізується

Система, що знаходиться вище пінча, вимагає підведення тепла із зовнішнього джерела і, отже, є стоком тепла. Система, що знаходиться нижче пінча, вимагає відведення

тепла за свої межі і тому є джерелом тепла.

Три основних правила пінч-аналізу полягають у наступному:

- не повинно бути передачі тепла через пінч;
- не повинно бути зовнішнього охолодження системи, що знаходиться вище пінча;
- не повинно бути підведення тепла з зовнішніх джерел до системи, що знаходиться нижче пінча.

Якщо через пінч передається кількість тепла  $\alpha$ , це означає, що така ж кількість тепла ( $\alpha$ ) має бути додатково підведена до «верхньої» системи і додатково відведена від «нижньої», рис.6.



Рис.6. Схема компенсації теплоти, що передається через пінч.

Аналогічним чином, будь-яке зовнішнє охолодження системи-стоку і будь-яке підведення тепла ззовні до системи-джерела тепла означають додаткові потреби в енергоресурсах в порівнянні з мінімальними теоретичними значеннями.

Тоді:  $T = A + \alpha$ , де:  $T$  - теоретичне мінімальне енергоспоживання;  $A$  - фактичне енергоспоживання;  $\alpha$  - потік енергії через пінч. Тобто, для досягнення мінімуму енергоспоживання необхідно виключити потік тепла через пінч.

Таким чином, використовуючи пінч-метод, можна визначити умови мінімуму енергоспоживання для всіх теплових технологічних процесів при переробці харчових продуктів.

Однако, як зазначено в [6], найважливішою умовою ефективного використання пінч-аналізу є наявність фактичних даних, особливо в тому випадку, якщо технологічний процес не є безперервним. Такі дані не можуть бути замінені ніякими оцінками або припущеннями, тому для досягнення енергозбереження (і відповідного зниження витрат) необхідно детальне

вимірювання характеристик (в т.ч. тимчасових) всіх технологічних потоків в складі процесу.

При реалізації проектів енергозбереження можливі складнощі і побічні ефекти. За даними [7] перелік типових проблем, що виникають, і завдань, які потрібно вирішувати при реалізації енергосберегаючих заходів, і перш за все - при організації міжпоточного тепло (масо) обміну, що робить все обладнання і процеси взаємопов'язаними та залежними один від іншого, наступний:

- пуск обладнання або перемикання його на інші режими тоді, коли ще немає теплоносіїв від інших апаратів процесу, які з'являться тільки після виходу установки на робочий режим;

- схожі з цим питання перерви в роботі окремих апаратів процесу; можливе виникнення нерівності теплових балансів апаратів, що виробляють і споживають тепло; в цьому випадку для компенсації нестачі або використання надлишку потрібні спеціальні конструктивно-технологічні рішення - додаткові теплообмінники, ходи, секції, доохолоджувачі, догрівачі, акумулятори тепла та ін.;

- залежне автоматичне регулювання взаємопов'язаних апаратів;

- втрати тепла в додаткових комунікаціях, необхідність їх теплоізоляції;

- можливі небажано великі відстані між апаратами, що обумовлює труднощі з трасуванням трубопроводів і суттєвих втрат тиску і температури; можлива необхідність додаткових насосів, газодувок тощо;

- в ряді процесів (випарювання, ректифікація, абсорбція і ін.) для отримання потрібних температурних напорів необхідна зміна тиску в апаратах, створення вакууму та ін., що в ряді випадків призводить до зміни умов фазової рівноваги.

Тому потрібно ретельно оцінювати результативність застосування пінч-технологій в кожному конкретному випадку.

### **Висновки**

1. В першу чергу при використанні пінч-методу необхідно провести попередній аналіз можливих проблем при реалізації проекту.

2. В даний час пінч-аналіз має репутацію дорогої і складної в застосуванні методології. Однак, в разі нескладних процесів розрахунки можуть виконуватися вручну або за допомогою програмних інструментів (в т.ч. тих, що розповсюджуються безкоштовно).

3. Рівень, з якого починається вартість проектів з застосуванням пінч-аналізу, становить близько 5 тис. євро. Нескладний аналіз може виконуватися навіть на основі незначної кількості даних.

4. З огляду на високу результативність пінч-аналізу, пінч-методологія є високоефективним і відносно дешевим методом

енергозбереження навіть при досить високій її вартості

5. Застосування пінч-технологій в харчовій галузі може бути дуже перспективним, враховуючи широке використання теплових режимів в процесах переробки харчових продуктів.

### **Список використаної літератури:**

1. Bodo Linnhoff. Introduction to Pinch Analysis / Linnhoff Bodo. - фирма Linnhoff March, 1998. - 63с.
2. Кустова А.А. Почему западная энергосервисная система не работает в России? / А.А. Кустова // Энергосбережение, № 8, 2008. – С.165.
3. Коновалов В.И. Современные аналитические подходы к энергосбережению / В.И. Коновалов, Т. Кудра // Вестник ТГТУ, Том 14, № 3, 2008. - С.560 - 578.
4. Salama A.I. Determination of the optimal heat energy targets in heat pinch analysis using a geometry-based approach / A.I. Salama // Computers & Chemical Engineering, V.30, 2006. - pp. 758 - 764.
5. Castier M. Pinch analysis revisited: New rules for utility targeting / M. Castier // Applied Thermal Engineering, V. 27, 1956. - pp. 1653 - 1656.
6. Смит Р. Основы интеграции тепловых процессов / Р. Смит, Й. Клемеш // Харьков: НТУ "ХПИ", 2000. - 458 с.
7. Коновалов В.И. Основные пути энергосбережения и оптимизации в тепло- и массообменных процессах и оборудовании / В. И. Коновалов, Н.Ц. Гатапова // Вестник ТГТУ, Том 14, № 4, 2008. – С.796 - 811.

### ***Рожкова Л.Г., Радчук О.В., Савченко-Перерва М. Ю. Перспективы применения пинч-технологий в энергосбережении на предприятиях пищевой отрасли***

*Статья посвящена перспективам применения пинч-анализа в пищевой отрасли. Рассмотрена методология применения пинч-анализа в мировой практике и применительно к процессам переработки пищевых продуктов. Поскольку пинч-анализ – методология минимизации энергопотребления технологического процесса путем расчета, обоснованного с точки зрения термодинамики объема энергопотребления, то внедрение пинч-технологий весьма перспективно при энергосбережении в пищевой отрасли.*

**Ключевые слова:** *энергосбережение, энергоэффективность, регенерация тепла, пинч-анализ, финансовая экономия, теплообменники, реконструкция, проектирование, оптимизация.*

### ***Rozhkova L.G, Radchuk O.V, Savchenko M. Yu. Perspectives of application of pinch technologies in energy saving at the enterprises of the food industry***

*The article is devoted to the prospects of applying pinch analyzes in the food industry. The methodology of applying pinch analysis in the world practice and in relation to processes of processing of food products is considered. Since pin analysis is a methodology for minimizing the energy consumption of a technological process by calculating a thermodynamic based on the amount of energy consumption, the introduction of pin technology is very promising at energy conservation in the food industry.*

*Currently pins analysis has a reputation as an expensive and complicated application of the methodology. However, in the case of simple processes, calculations can be performed manually or with the help of software tools (including those distributed free of charge).*

*The level at which the cost of projects with the use of pin-analysis begins, is about 5 thousand euros. A simple analysis can be performed even on the basis of a small amount of data.*

*Given the high impact of pinch analysis, pinch methodology is a highly effective and relatively cheap energy saving method, even at its fairly high cost.*

*Punch technology in the food industry can be very promising, given the widespread use of thermal regimes in the processing of food products.*

**Keywords:** *energy saving, energy efficiency, heat regeneration, pin analysis, financial savings, heat exchangers, reconstruction, design, optimization.*