

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2026-299-1-92-96>

УДК 66.012

ОСОБЛИВОСТІ АВТОМАТИЗАЦІЇ ТЕПЛОВИХ ПРОЦЕСІВ НАГРІВАННЯ РІДИНИ

Карпюк Л. В., Давіденко Н. О., Ганжа С. А.

AUTOMATION FEATURES OF THERMAL PROCESSES FOR HEATING LIQUIDS

Karpiuk L. V., Davidenko N. O., Ganzha S. A.

В даній статті розглянуто принципи процесу управління теплом на прикладі кожухотрубного теплообмінника з поверхнею керування, до якого подається теплоносієм та нагрівальний продукт. Показником ефективності процесу є температура продукту на виході з теплообмінника, а метою керування є підтримка цієї температури на певному рівні. Автоматизація виробничих процесів – основний напрямок, за яким нині просувається виробництво в усьому світі. Усе, що раніше виконувалося самою людиною, її функції, не тільки фізичні, а й інтелектуальні, поступово переходять до техніки, яка сама виконує технологічні цикли і здійснює контроль над ними. Завдяки автоматизації, технологія теплообміну зробила крок далеко вперед. Висока якість регулювання, забезпечення безпеки протікання реакції, швидкість здійснення процесів і багато іншого дають змогу забезпечувати технічні засоби автоматизації. Температура є показником термодинамічного стану системи і використовується як вихідна координата під час регулювання теплових процесів. Динамічні характеристики об'єктів у системах регулювання температури залежать від фізико-хімічних параметрів процесу і конструкції апарата. Тому загальні рекомендації щодо вибору АСР температури сформулювати неможливо, і потрібен аналіз кожного конкретного процесу. До загальних особливостей АСР температури можна віднести значну інерційність теплових процесів і промислових датчиків температури. Теплові процеси відіграють значну роль у хімічній технології. Хімічні реакції речовин, а також їх фізичні перетворення, як правило, супроводжуються тепловими явищами. Теплові ефекти часто складають основу технологічних процесів. Нагрівання здійснюють за допомогою різних нагрівальних теплоносіїв (основні з яких водяна пара, гаряча вода, топкові гази і нагріте повітря, висококиплячі органічні речовини

рідини), а також електричного струму. Вибір нагрівального теплоносія залежить в першу чергу від необхідної температури нагріву і можливості її регулювання. Крім того, теплоносієм повинен забезпечити досить високу інтенсивність теплообміну при невеликих його витратах, мати малу в'язкість, але високу щільність, теплоємність і теплоту пароутворення. Бажано також, щоб теплоносієм був негорючим, нетоксичним, термічно стійким, не мав руйнівного впливу на матеріал апарату і водночас був доступною і дешевою речовиною.

Ключові слова: теплообмінник, автоматизація, температура, тиск, теплоносієм, нагрівальний продукт, керування, регулювання.

Вступ. Передачу тепла від гарячих теплоносіїв до більш холодних здійснюють у теплообмінниках. У зв'язку з цим, питання автоматизації теплообмінників, пов'язані з передачею тепла, відіграють істотну роль.

Теплообмінні апарати класифікуються таким чином: за видом теплообмінної поверхні; за фізичним процесом, що відбувається з основною технологічною речовиною; за характером роботи в часі та іншими ознаками.

Поверхневі теплообмінники досить широко використовуються в хімічній технології, оскільки теплоносії в таких апаратах розділені теплопередаючою поверхнею: в трубчастих теплообмінниках – стінки трубок, в пластинчастих теплообмінниках – плоскі або рифлені листи. Поширеною конструкцією теплообмінної апаратури трубчастого типу є кожухотрубний теплообмінник. Кожухотрубні теплообмінники поділяють на теплообмінники з

незмінним агрегатним станом речовин, а також теплообмінники зі змінним агрегатним станом речовин.

Особливістю теплообмінників зі змінним агрегатним станом речовин, що розглядаються як об'єкти регулювання, є рівність температур рідкої та парової фаз при постійному тиску та відсутності переохолодження конденсату, що утворюється (перегріву пари, що утворюється). Оскільки температура рідкої та парової фаз однакова, вона не може слугувати показником процесу випаровування або конденсації. Тоді в якості основного показника процесу теплообміну вибирають рівень рідкої фази.

У кожухотрубних парорідинних теплообмінниках, призначених для нагрівання рідини до заданої температури за рахунок теплоти конденсації нагрівальної пари, основним завданням регулювання є стабілізація температури рідини на виході з теплообмінника.

Тепер з урахуванням виявлених основних збурюючих і керуючих впливів можна запропонувати кілька варіантів систем регулювання температури рідини на виході з промислових кожухотрубних парорідинних теплообмінників.

Перший варіант. Для регулювання вихідної температури рідини без статичної помилки можна застосувати одноконтурну замкнуту САР з використанням ПІ-регулятора або ПІД-регулятора, що змінює витрату нагрівальної пари. Недоліки такого регулювання: при сильних збурюючих впливах по каналах витрати або температури рідини на вході в теплообмінник якість перехідного процесу виявляється незадовільною.

Другий варіант. Якщо мають місце збурюючі впливи по каналах витрати або температурі рідини на вході, то обмежуються їх статичною компенсацією. Реалізувати такий підхід можливо застосуванням каскадної САР співвідношення витрат пари і рідини з корекцією по третьому параметру – температурі рідини на виході теплообмінника.

Третій варіант. При сильних збурюючих впливах по каналах зміни тиску або температури нагрівальної пари можливо застосувати каскадну систему регулювання температури (або тиску) в міжтрубному просторі теплообмінника. Температура (або тиск) в міжтрубному просторі теплообмінника – проміжна координата, яка значно швидше реагує на зазначені збурюючі впливи, ніж температура рідини на виході теплообмінника.

Четвертий варіант. Щоб забезпечити високу якість регулювання температури, бажано мати додатковий керуючий вплив. Для цього рідину, що надходить на нагрівання, перед теплообмінником ділять на два потоки. Частина рідини направляють у теплообмінник і нагрівають до температури, трохи вищої за задану. Інша частина рідини мінає теплообмінник, залишаючись холодною. За теплообмінником нагрітий і холодний потоки змішуються для отримання рідини заданої температури. Таким чином, реалізується схема з байпасуванням. У цьому випадку регулятор температури стабілізує температуру після теплообмінника [4].

Викладення основного матеріалу. Розглянемо принципи процесу управління теплом на прикладі кожухотрубного теплообмінника з поверхнею керування (рис. 1), до якого подається теплоносія та нагрівальний продукт. Показником ефективності процесу є температура продукту на виході з теплообмінника, а метою керування є підтримка цієї температури на певному рівні. Залежність температури від параметрів процесу можна знайти з рівняння теплового балансу:

$$G_p \cdot c_p \cdot (t_p'' - t_p') = G_c \cdot c_c \cdot (t_c'' - t_c'),$$

де: G_p, G_c – витрата продукту та гарячого теплоносія;

c_p, c_c – питома теплоємність продукту та гарячого теплоносія;

t_p', t_c' – температура продукту та гарячого теплоносія на вході в теплообмінник; □

t_p'', t_c'' – температура продукту та гарячого теплоносія на виході з теплообмінника.

Розв'язуючи рівняння теплового балансу для t_p'' , отримуємо:

$$t_p'' = (G_c \cdot c_c / G_p \cdot c_p) \cdot (t_c' - t_c'') + t_p'$$

Витрати теплоносія G_c легко стабілізуються та можуть бути використані для впровадження ефективних керуючих втручань. Витрати продукту G_p визначаються іншими технологічними процесами, а не процесом нагрівання, тому їх неможливо стабілізувати або використовувати для впровадження керуючих втручань; зі зміною G_p у теплообмінник надходять сильні збурення.

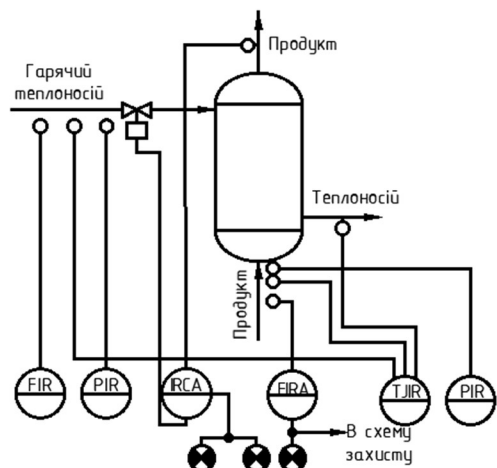


Рис. 1. Типова схема автоматизації процесу нагрівання

Температури t'_p, t'_c та питомі теплоємності c_p, c_c визначаються технологічними умовами інших процесів, тому стабілізувати їх у процесі нагрівання неможливо. Неліквідовані збурення також містять зміни температури навколишнього середовища та властивостей теплопередачі стінки внаслідок відкладення солей та корозії [1,2].

Аналізуючи об'єкт керування, можна побачити, що більшість збурень неможливо усунути. У зв'язку з цим температуру t''_c слід прийняти за керуючу змінну та здійснювати регулюючий вплив шляхом зміни витрат G_c .

Теплообмінник як об'єкт регулювання температури має більшу затримку, тому слід приділити особливу увагу вибору місця установки датчика та закону регулювання. Щоб зменшити затримки в роботі, датчик температури слід розміщувати якомога ближче до теплообмінника. Для усунення затримки можуть бути ефективними контролери з попередньо встановленими значеннями та приводи з позиціонерами. В якості контрольованих змінних слід брати витрату теплоносія, його кінцеву і початкову температуру, тиск. Знання поточних значень цих параметрів необхідне для нормального запуску, введення в експлуатацію і роботи процесу. Також необхідно знати витрату G_c для розрахунку техніко-економічних параметрів процесу, а витрату G_p і температуру t''_c – для оперативного управління процесом.

Температура t''_c і витрата продукту повинні контролюватися. Оскільки різке падіння витрати G_p часто є причиною виходу з ладу теплообмінника, захисний пристрій в цьому

випадку повинен перекривати лінію гарячого теплоносія.

Всі аргументи, що стосуються процесу нагрівання, є справедливими і для процесу охолодження. Об'єктом регулювання в цьому випадку буде кожухотрубний теплообмінник, який подає охолоджуючу рідину і охолоджуваний продукт; показником ефективності є кінцева температура продукту, а метою регулювання є підтримка цієї температури на заданому рівні. Основний блок управління буде контролювати кінцеву температуру охолоджуваного продукту, регулювання буде здійснюватися шляхом зміни витрати охолоджуючої рідини [1,2,3].

Каскадне регулювання. Використання двоконтурних систем автоматичного регулювання значно покращує якість контролю температури кінцевого продукту, якщо параметр, що сильно впливає на процес теплопередачі, вибрано як допоміжну регульовану змінну. Часто в якості допоміжного параметра вибирають витрату охолоджуючої рідини (рис. 2); якщо охолоджуючою рідиною є пара зі змінним тиском, то краще вимірювати тиск охолоджуючої рідини або тиск у міжтрубному просторі.

Останній варіант слід використовувати при змінній температурі та нагріванні потоком, оскільки тиск у міжтрубному просторі набагато менший за інерційний параметр, ніж температура кінцевого продукту.

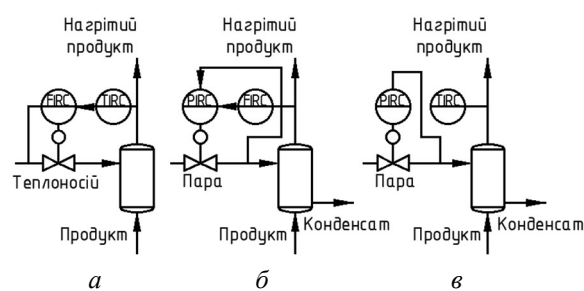


Рис. 2. Двоконтурна система регулювання процесу нагрівання з використанням допоміжних змінних показників витрати:

а – охолоджуючої рідини, б – тиску пари, в – тиску в міжтрубному просторі

Регулювання шляхом обходу продуктів. Для управління системами, в яких неможливо змінити швидкість потоку теплового конденсатора, використовується метод байпасу.

Регулюючий ефект у цьому випадку здійснюється шляхом зміни потоку байпасного продукту (рис. 3, а).

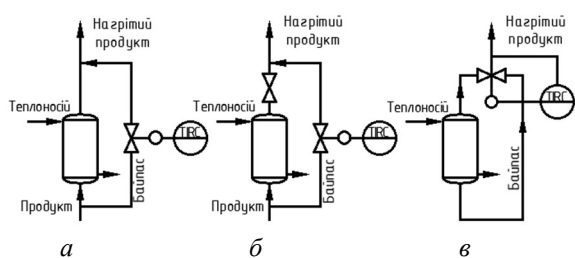


Рис. 3. Схема регулювання зміни температури потоку продукту через байпасну трубу:
 а – через один клапан; б – через два клапани;
 в – через триходовий клапан

Оскільки рух регулюючого органу в обвідній лінії все ще призводить до деяких змін у потоці продукту при високих вимогах до стабільності потоку, встановлюються два мембранні приводи різного типу (рис. 3, б). Аналогічний ефект досягається шляхом встановлення триходового змішувального клапана (рис. 3, в).

Метод управління покращує динамічні характеристики обходу системи, оскільки виключається цей ланцюг управління теплообмінником.

Регулювання шляхом зміни витрати конденсату гріючої пари. Якщо теплообмінник працює з частковим виливом конденсату, регулюючий вплив може здійснюватися зміною витрати конденсату, що призводить до зміни рівня конденсату в теплообміннику. У цьому випадку поверхня теплообміну розподіляється між конденсуючою парою та продуктом з одного боку, та конденсатом та продуктом – з іншого.

Інтенсивність теплообміну, а отже і температура продукту, що виходить з теплообмінника, змінюється. Ця система дозволяє підвищити ефективність теплообмінника на 6–7% за рахунок повного використання тепла пари і конденсату. Однак через великі затримки, систему можна рекомендувати тільки за відсутності раптових збурюючих впливів.

Керування процесами в теплообмінниках змішування. Найменша зміна параметрів теплоносія під час безпосереднього змішування двох або більше рідин призводить до значних і швидких змін температури кінцевого продукту, тому в управлінні теплообмінниками змішування часто використовуються пов'язані регулювання та співвідношення витрати та продукту з корекцією температури продукту [5,6].

Висновки. Для усунення небезпеки вибуху в поверхневих теплообмінниках необхідно передбачити методи і засоби, що запобігають взаємному проникненню теплоносія (якщо це може призвести до утворення вибухонебезпечного середовища). Це особливо стосується теплообмінників, в яких тиск палива-теплоносія перевищує тиск негорючого теплоносія. При зниженні рівня горючих рідин, що нагріваються в теплообміннику, та оголенні поверхні теплообміну (що може призвести до перегріву, висихання та розкладання горючих продуктів і розвитку неконтрольованих процесів) має спрацювати сигналізація та блокування пристрою (останнє повинно зупинити потік нагріваючого агента).

Нині системи автоматизованого управління активно використовують на виробництві, зокрема й для здійснення теплообмінних процесів. При цьому такі процеси займають до 40% від усіх технологічних процесів у хімічній промисловості по всьому світу. Грамотне й ефективне розв'язання завдань автоматизації апаратів, що реалізують теплообмін, дає змогу забезпечити працівників, замінюючи ручну працю, при цьому здійснювати економію технічних ресурсів підприємства, а також підвищувати якість одержуваної сировини.

Література

- 1 Стенцель Й. І. Автоматизація технологічних процесів хімічних виробництв: Навч. посібник. К. : ІСДО, 1995. 360 с.
- 2 Стенцель Й. І. Автоматика та автоматизація хіміко-технологічних процесів: Навч. посібник. Луганськ: вид-во Східноукр. нац. ун-ту ім В. Даля, 2004. 376 с.
- 3 Стенцель Й. І. Автоматизація технологічних процесів хімічних виробництв. Конспект лекцій (електронний варіант). 2009. 287 с.
- 4 Барало О. В., Самійленко П. Г. та ін. Автоматизація технологічних процесів і систем автоматичного керування. К. : Аграрна освіта, 2010. 557 с.
- 5 Автоматизація виробничих процесів. Кіровоград: Видавець Лисенко В. Ф., 2016. 352 с.
- 6 Ельперін І. В., Пупена О. М., Сідлецький В. М., Швед С. М. Автоматизація виробничих процесів: підручник / Вид. 2-ге, виправлене. К. : Вид. Ліра-К, 2021. 378 с.

References

1. Stentsel Y. I. Avtomatyzatsiia tekhnolohichnykh protsesiv khimichnykh vyrobnytstv: Navch. posibnyk. K. : ISDO, 1995. 360 s.
2. Stentsel Y. I. Avtomatyka ta avtomatyzatsiia khimiko-tekhnolohichnykh protsesiv: Navch. posibnyk. Luhansk: vyd-vo Skhidnoukr. nats. un-tu im V. Dalia, 2004. 376 s.
3. Stentsel Y. I. Avtomatyzatsiia tekhnolohichnykh protsesiv khimichnykh vyrobnytstv. Konspekt lektsii (elektronnyi variant). 2009. 287 s.
4. Baralo O. V., Samiilenko P. H. ta in. Avtomatyzatsiia tekhnolohichnykh protsesiv i system avtomatychnoho keruvannia. K. : Ahrarna osvita, 2010. 557 s.
5. Avtomatyzatsiia vyrobnychykh protsesiv. Kirovohrad: Vydavets Lysenko V. F., 2016. 352 s.
6. Elperin I. V., Pupena O. M., Sidletskyi V. M., Shved S. M. Avtomatyzatsiia vyrobnychykh protsesiv: pidruchnyk / Vyd. 2-he, vypravlene. K. : Vyd. Lira-K, 2021. 378 s.

Karpiuk L. V., Davidenko N. O., Ganzha S. A.
Automation features of thermal processes for heating liquids

This article discusses the principles of heat management using the example of a shell-and-tube heat exchanger with a control surface to which a heat transfer fluid and a heating product are supplied. The indicator of the process efficiency is the temperature of the product at the outlet of the heat exchanger, and the control objective is to maintain this temperature at a certain level. Automation of production processes is the main direction in which production is currently moving worldwide. Everything that was previously performed by humans, their functions, not only physical but also intellectual, are gradually being transferred to technology, which performs technological cycles and controls them. Thanks to automation, heat exchange technology has taken a big step forward. High-quality control, ensuring the safety of reactions, speed of processes, and much more are made possible by technical automation tools. Temperature is an indicator of the thermodynamic state of a system and is used as an output coordinate when controlling thermal processes. The dynamic characteristics of objects in temperature control systems depend on the physical and chemical parameters of the process and the design of the device. Therefore, it is impossible to formulate general recommendations for selecting a temperature control

system, and each specific process must be analyzed. The general characteristics of temperature control systems include the significant inertia of thermal processes and industrial temperature sensors. The dynamic characteristics of objects in temperature control systems depend on the physical and chemical parameters of the process and the design of the device. Therefore, it is impossible to formulate general recommendations for selecting a temperature control system, and each specific process must be analyzed. The general characteristics of temperature control systems include the significant inertia of thermal processes and industrial temperature sensors. Thermal processes play a significant role in chemical technology. Chemical reactions of substances, as well as their physical transformations, are usually accompanied by thermal phenomena. Thermal effects often form the basis of technological processes. Heating is carried out using various heating media (the main ones being steam, hot water, furnace gases and heated air, high-boiling organic liquids), as well as electric current. The choice of heating medium depends primarily on the required heating temperature and the possibility of regulating it. In addition, the heat transfer fluid must ensure a sufficiently high heat exchange intensity at low consumption rates, have low viscosity but high density, heat capacity, and heat of vaporization. It is also desirable that the heat transfer fluid be non-flammable, non-toxic, thermally stable, have no destructive effect on the material of the apparatus, and at the same time be an affordable and inexpensive substance.

Keywords: heat exchanger, automation, temperature, pressure, heat transfer fluid, heating product, control, regulation.

Карпюк Людмила Вікторівна – старший викладач кафедри комп'ютерно-інтегрованих систем управління, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, karp224@gmail.com

Давіденко Наталія Олександрівна – старший викладач кафедри іноземної філології та перекладу, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, nat.davidenkoi1@gmail.com

Ганжа Світлана Анатоліївна – викладач вищої категорії, методист, Сєверодонецький політехнічний фаховий коледж Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, gsaua@ukr.net

Стаття подана 13.12.2025.