

<https://doi.org/10.31891/2219-9365-2023-75-17>

УДК 622.24

ВАСИЛЕНЧУК Михайло

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
mykhailo.vasylenchuk-a15122@nung.edu.ua

ГОРБІЙЧУК Михайло

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
mi_profgorb@ukr.net

КОГУТЯК Мирослав

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
myroslav.kohutiak@nung.edu.ua

СИНТЕЗ ЛІНЕАРИЗОВАНИХ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ НАГРІВНИКА З ПРОМІЖНИМ ТЕПЛОНОСІЄМ

В даній роботі розглянуто концепцію нагрівачів непрямого типу з проміжним теплоносієм. Здійснено порівняння нагрівачів прямого і непрямого типів, розглянуто переваги і недоліки обох. Також виконано огляд джерел, праць і досліджень характеристик шляхових нагрівачів, алгоритми для роботи автоматики, яка здійснює керування нагрівачем непрямого типу, розрахунки потужності джерел тепла для нагрівачів непрямого типу, а також заходи для підвищення к.к.д. нагрівача.

Проведено синтез лінеаризованої математичної моделі нагрівника непрямого типу, здійснено дослідження динамічних властивостей каналів передачі як керуючих дій і збурень. Виконано синтез рівнянь енергетичного балансу для основних потоків та стінок теплопередачі, здійснено їхню лінеаризацію і отримано систему диференціальних рівнянь у відхиленнях. Після чого перетворено рівняння за методом Лапласа і матрично-векторним методом, що дало змогу вивести передавальні функції, які утворюють лінеаризовану математичну модель процесу нагріву нафти в шляховому нагрівнику і дозволяють створити ефективну систему автоматичного керування процесом нагріву нафти.

Ключові слова: непрямий нагрівач, теплоносій, лінеаризована математична модель, об'єкт керування, передавальна функція.

VASYLENCHUK Mykhailo, HORBIICHUK Mykhailo, KOGUTYAK Myroslav

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas

SYNTHESIS OF LINEARIZED MATHEMATICAL MODELS OF THE HEATER WITH INTERMEDIATE HEAT CARRIER

In this work, the concept of indirect type heaters with an intermediate coolant is considered. A comparison of heaters of direct and indirect types was made, the advantages and disadvantages of both were considered. An overview of the sources, works and studies of the characteristics of path heaters, algorithms for the operation of automation that controls the indirect type heater, calculations of the power of heat sources for indirect type heaters, as well as measures to increase the efficiency of the heater were also performed.

The synthesis of the linearized mathematical model of the indirect type heater was carried out, the dynamic properties of the transmission channels as control actions and disturbances were studied. The energy balance equations for the main flows and heat transfer walls were synthesized, their linearization was carried out, and a system of differential equations in deviations was obtained. After that, the equation was transformed using the Laplace method and the matrix-vector method, which made it possible to derive the transfer functions that form a linearized mathematical model of the oil heating process in the flow heater and allow creating an effective system of automatic control of the oil heating process.

Key words: Indirect heater, indirect heater/coolant, coolant/linearized mathematical model, linearized mathematical model/control object, control object/transfer function, transfer function.

Постановка проблеми у загальному вигляді

та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Нагрівачі непрямого типу з водяною ванною (Indirect Water Bath Heaters) в основному використовуються в нафтовій і газовій промисловості для нагрівання робочих середовищ [1]. Механізм теплопередачі відбувається опосередковано через ванну (ємкість), на відміну від нагрівання безпосередньо полум'ям або піччю. Використання ванни сприяє рівномірному нагріванню та зменшує ймовірність появи гарячих ділянок. Гарячі ділянки часто виникають у нагрівачах з прямим підігрівом димовими газами в результаті накопичення відкладень на стороні робочої рідини. Якщо його не контролювати, це накопичення може стати джерелом деградації технологічної обладнання та може призвести до розривів, вибухів та витоків. Через непрямий характер нагрівачів ризик небезпеки значно нижчий (горючі потоки ізольовані) порівняно з нагрівачами з прямим підігрівом, тому їх можна використовувати у небезпечних зонах, де безпека викликає занепокоєння.

"Непряма" назва походить від того факту, що жарова труба занурена у ванну, яка забезпечує нагрівання через проміжне середовище зануреного пучка труб, що містить технологічний потік. Зазвичай теплоносієм є вода, але залежно від клімату та вимог до нагріву це також може бути масло (здатне нагрівати

технологічні рідини до більш високих температур) або суміш води та гліколю (використовується в холодному кліматі для зниження температури замерзання). Типова схема нагрівача показана на рис. 1.

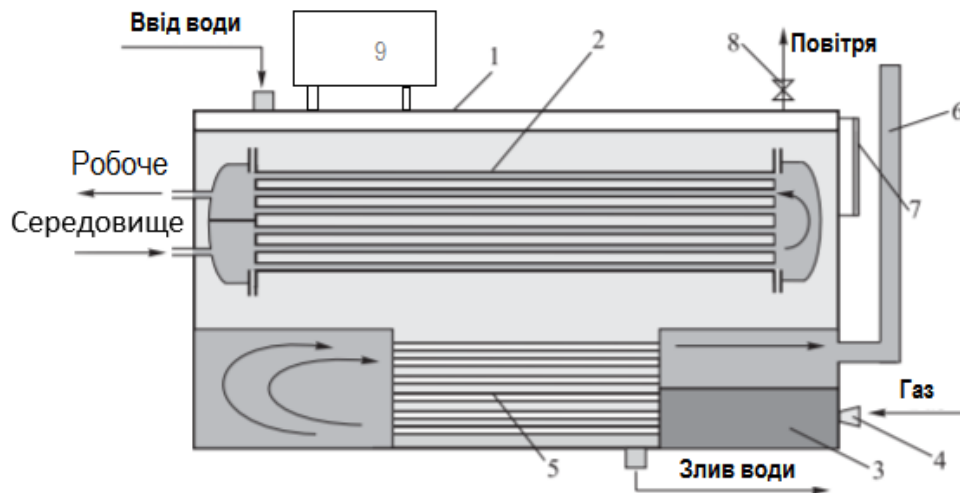


Рис. 1. Шляховий нагрівач : 1 - корпус (ванна); 2 - теплообмінні труби; 3 - камера згорання газу; 4 - форсунка газу; 5 - жарові труби (газохід); 6 - димохід; 7 - показник рівня води; 8 - кран для скидання газу; 9 - розширювальний бак.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

У системі промислового збору, підготовки та транспортування нафти перед подачею до сепараційної установки її підігрівають у шляхових підігрівачах [2]. У порівнянні з нагрівниками прямого нагріву шляхові нагрівачі мають нижчий коефіцієнт корисної дії (к.к.д.).

Аналіз літературних джерел показав, що основні напрямки досліджень спрямовані на підвищенні ефективності роботи шляхових нагрівників нафти. Роботи у цьому напрямку можна розділити дві групи [3]. У першій групі робіт розглядаються задачі покращення процесу спалювання газу, утилізації тепла димових газів, залучення до підігріву додаткових джерел енергії. Друга група робіт присвячена синтезу систем автоматичного керування процесом підігріву нафти у шляхових нагрівниках.

На теперішній час для керування процесом нагріву нафти в шляхових нагрівачах застосовують штатну автоматику [2], яка реалізує найпростіші алгоритми керування в одно контурних системах.

Підвищення екологічних вимог щодо викидів парникових газів при розробці газових родовищ та впровадження ошадливих технологій створює передумови для розроблення досконалих та ефективних систем автоматичного керування процесом підготовки нафти і зокрема шляхових нагрівачів нафти.

Підвищення ефективності роботи нагрівачів нафти залишається поза увагою науковців з тієї причини, що основним паливом є попутний газ, який не збирається і не транспортується до споживачів через економічну недоцільність. Попутний газ використовується, як правило, для підігріву з метою підвищення ефективності сепарації нафти, а його надлишок спалюється на факельному господарстві.

Протилежна ситуація має місце на газоконденсатних родовищах, де для нагріву газового конденсату в шляхових нагрівачах спалюють комерційний газ.

Тому останні публікації присвячені підвищенню ефективності роботи шляхових нагрівачів в технологічних схемах газорозподільних станцій.

Тут слід відмітити роботу [4], в якій наведена математична модель нагрівника разом з редуційним клапаном та побудовані перехідні характеристики для дослідженні динамічні властивості такого об'єкта.

У роботі [5] проведені дослідження, що стосуються динамічних властивостей шляхового нагрівача, який працює у складі газорозподільної станції; запропоновано нове технічне рішення: з метою підвищення к.к.д. установки оснастити шляховий нагрівач сонячною станцією з водяним акумулятором. Створена для цього математична модель має той недолік, що не врахована динаміка передачі тепла через стінки жарових труб (рис.1).

Заходи, які запропоновані у роботах [6, 7] дають змогу підвищити к.к.д. нагрівника майже на 27 % у порівнянні з базовим варіантом. Такий ефект досягається завдяки рекуператії тепла вихідних димових газів для попереднього підігріву повітря, яке поступає в камеру згорання.

У роботі [8] використані методи імітаційного моделювання, на основі яких розроблені рекомендації щодо регулювання довжини полум'я факела в камері згорання та по вибору оптимального співвідношення газ-повітря.

Використання імітаційної моделі шляхового нагрівника, дозволило авторам роботи [9] дослідити систему автоматичного регулювання температури на виході редуційного клапану, що запобігає гідроутворенню, яке виникає як результат ефекту Джоуля-Томсона.

Таким чином, проведений аналіз літературних джерел, вказує на актуальність вибраного напрямку досліджень, який ґрунтується на математичному моделюванні теплових процесів у шляховому нагрівнику з врахуванням теплового балансу, що дасть змогу врахувати динаміку передачі тепла через стінки жарової труби і на цій основі синтезувати ефективну систему автоматичного керування процесом нагріву нафти.

Формулювання цілей статті

Синтезувати лінеаризовану математичну модель нагрівника, дослідити динамічні властивості каналів передачі як керуючих дій, так і збурень для подальшого проведення імітаційного моделювання основних режимів його роботи та синтезу систем керування для підвищення ефективності і безпечної роботи шляхового нагрівника.

Виклад основного матеріалу

На основі аналізу процесу теплообміну у шляховому нагрівнику з проміжним теплоносієм та основних режимних технологічних параметрів контролю та регулювання розроблена структурна схема нагрівника як об'єкта автоматизації зображена на рис.2. Керуюча дія: B -витрата палива; U - сигнал керування клапаном подачі палива.

Збурювальні чинники: G_n - витрата нафти; T_n^{in} - температура продукту на вході нагрівника;

Вихідні параметри: T_n^{out} - температура продукту (нафти) на виході; T_w - температура проміжного теплоносія (води); $T_{dg\uparrow}$ - температура димових газів на виході газоходу.

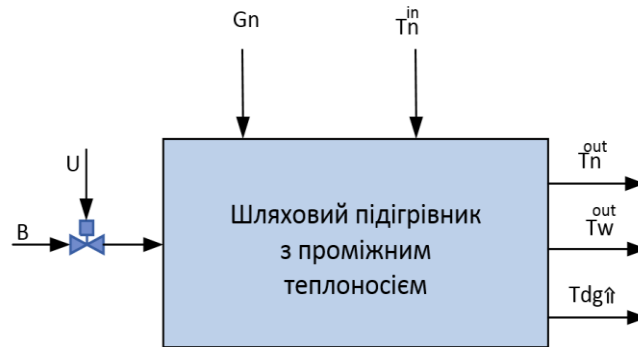


Рис. 2. Функціональна схема нагрівника як об'єкта керування

У роботі [3] математичний опис нагрівника отриманий при таких допущеннях:

- продуктовий теплообмінник і газохід замінюється зосередженою ланкою, у якій поверхні обміну, товщина і маса металу стінок відповідають цим же параметрам реальних елементів нагрівника;
- температура середовищ у продуктовому змійовику та газоході дорівнює середній температурі середовищ на вході і виході даних елементів, а у ванні з теплоносієм середньому значенню діапазону паспортних робочих температур;
- передача тепла через поверхні теплообміну продуктового змійовика та від стінки газоходу до теплоносія відбувається шляхом конвекції, а від димових газів до стінки газоходу – радіантним та конвекційним способами;
- тепловий опір теплообмінних стінок дуже малий, тому їх температура в усіх точках однакова;
- густина середовищ і матеріалу стінок є постійною і не залежить від температури.

На основі аналізу нагрівника як об'єкта керування отримані рівняння енергетичного балансу для основних потоків та стінок теплопередачі (рис. 2).

Отже,

$$\tau_n \frac{d(T_n^{out} + T_n^{in})}{dt} = -2k_{n,l} G_n (T_n^{out} - T_n^{in}) - (T_n^{out} + T_n^{in}) + T_{sz}, \quad (1)$$

$$\tau_{sz} \frac{dT_{sz}}{dt} + T_{sz} = k_{wep} T_w + k_{nep} T_{nep}, \quad (2)$$

$$\tau_w \frac{dT_w}{dt} + T_w = k_{sdk} T_{sdk} + k_{sz} \cdot T_{sz}, \quad (3)$$

$$\frac{dT_{dg\uparrow}}{dt} = \frac{1}{0,5L_1} \left((k_5 - k_1 \cdot T_{dg\uparrow}) \cdot G(U) - k_2 \left(0,5(T_{\max} + T_{dg\uparrow}) \right)^4 + k_3 (T_{sdk})^4 - k_4 \cdot \left(0,5(T_{\max} + T_{dg\uparrow}) - T_{sdk} \right)^{5/4} \right), \quad (4)$$

$$\frac{d}{dt} T_{sdk} = \frac{1}{M_{dk} \cdot c_{dk}} \left(0,5 \cdot \psi \cdot (\varepsilon_c + 1) C_0 F_{dk} \left[\varepsilon_{dg} \left(\frac{T_{\max} + T_{dg\uparrow}}{200} \right)^4 - A_{dg} \left(\frac{T_{sdk}}{100} \right)^4 \right] + \dots + 2,1 \cdot F_{dk} \cdot \sqrt[4]{(0,5(T_{\max} + T_{dg\uparrow}) - T_{sdk})} \cdot (0,5(T_{\max} + T_{dg\uparrow}) - T_{sdk}) - C_{sdk_w} \cdot F_{dk} \cdot (T_{sdk} - T_w) \right), \quad (5)$$

де $\tau_n = \frac{M_n \cdot c_n}{C_{sz-n} F_z}$ - постійна часу; $k_{n,1} = \frac{c_n}{C_{sz-n} F_z}$; C_{sz-n} - коефіцієнт теплопередачі від стінки до середовища, що нагрівається; F_z - площа поверхні обміну змійовика; M_n - маса продукту (нафти) у змійовику; G_n - масова витрата нафти; c_n - середня теплоємність нафти; $T_{ncp} = 0,5(T_n^{in} + T_n^{out})$ - середня температура нафти; T_w - температура проміжного теплоносія (води); $\tau_{sz} = \frac{M_z \cdot c_z}{(C_{w_sz} + C_{sz-n}) F_z}$;

$k_{wep} = \frac{C_{w_sz}}{C_{w_sz} + C_{sz-n}}$; $k_{nep} = \frac{C_{sz-n}}{C_{w_sz} + C_{sz-n}}$; C_{w_sz} - коефіцієнт теплопередачі від води до стінки; M_z -

маса стінки, c_z - теплоємність стінки, Q_{w_sz} - тепловий потік від води до стінки; $T_{dg\uparrow}$ - температура димових газів на виході; $G(U)$ - витратна характеристика регулюючого клапану; $T_{dgc} = 0,5(T_{\max} + T_{dg\uparrow})$; T_{\max} - максимальна розрахункова температура горіння, що еквівалентно температурі димових газів в топці; T_{sdk} - температура стінки димового каналу; $L_1 = V_{zdg} \rho_{cpdg} c_{cpdg}$; $k_1 = C_{dg\uparrow} \cdot B_{\max} (1 + \alpha L_0)$; $k_2 = 0,5 \cdot 10^{-8} (\varepsilon_c + 1) C_0 F_{dk} \cdot \varepsilon_{dg}$; $k_3 = 0,5 \cdot 10^{-8} (\varepsilon_c + 1) C_0 F_{dk} \cdot A_{dg}$; $k_4 = 2,1 \cdot F_{dk}$; $k_5 = B_{\max} \cdot \eta_T \cdot q_g^H$; V_{zdg} - об'єм димового каналу нагрівника; ρ_{cpdg} - середня густина димових газів; $c_{cpdg} = 0,5(c_{dg}^{\uparrow} + c_{dg}^T)$ - середня теплоємність димових газів; $\varepsilon_c = 0,85$; $c_{dg}^{\uparrow}, c_{dg}^T$ - теплоємність продуктів згорання на виході печі і топки; q_g^H - теплота згорання паливного газу; $\eta_T = 0,95$;

$\tau_w = \frac{M_w c_w}{C_{sdk_w} F_{dk} + C_{w_sz} F_z}$ - постійна часу; $k_{sdk} = \frac{C_{sdk_w} F_{dk}}{C_{sdk_w} F_{dk} + C_{w_sz} F_z}$; $k_{sz} = \frac{C_{w_sz} \cdot F_z}{C_{sdk_w} \cdot F_{dk} + C_{w_sz} F_z}$.

Як початкові умови диференціальних рівнянь (1) – (5) вибрані певні «базові» значення температур з відповідними індексами та значення витрати нафти $G_n^{(0)}$ і командного сигналу $U^{(0)}$.

Таким чином, система диференціальних рівнянь (1) – (5) описує динамічні властивості нагрівника нафти як об'єкта автоматичного керування.

Допустили, що відхилення технологічних параметрів від своїх базових значень невеликі. Тому нелінійні рівняння (1), (4) і (5) були лінеаризовані.

Після лінеаризації математичної моделі (1) – (5) нагрівника відносно «базових» значень технологічних параметрів [3], отримали систему диференціальних рівнянь у відхиленнях:

$$\tau_n \frac{d(\theta_n^{out} + \theta_n^{in})}{dt} = (k_{\theta n} - 1) \theta_n^{in} - (k_{\theta n} + 1) \theta_n^{out} + \theta_{sz} + k_g g_n, \quad (6)$$

$$\tau_{sz} \frac{d\theta_{sz}}{dt} + \theta_{sz} = k_{wep} \theta_w + k_{nep} \theta_{ncp}, \quad (7)$$

$$\tau_w \frac{d\theta_w}{dt} + \theta_w = k_{sdk} \theta_{sdk} + k_{sz} \cdot \theta_{sz}, \quad (8)$$

$$\frac{d\theta_{dg\uparrow}}{dt} = -k_{dg} \theta_{dg\uparrow} + k_{sdk} \theta_{sdk} + k_u u, \quad (9)$$

$$\frac{d\theta_{sdk}}{dt} = k_{t,1} \theta_{dgcp} - k_{t,2} \theta_{sdk} + k_{t,3} \theta_w, \quad (10)$$

$$\theta_n^{out} = 2\theta_{ncp} - \theta_n^{in}, \quad (11)$$

де θ – відхилення температур (з відповідними індексами) від своїх базових значень; $g_n = G_n - G_n^{(0)}$; $u = U - U^{(0)}$.

Відмітимо, що диференціальні рівняння (2) і (3) – лінійні і їх параметри при записі у відхиленнях залишились незмінними.

Рівняння (9) і (10) запишемо в стандартній формі

$$\tau_{\theta 1} \frac{d\theta_{dg\uparrow}}{dt} + \theta_{dg\uparrow} = K_{\theta 1} \theta_{sdk} + K_u u, \quad (12)$$

$$\tau_{t,1} \frac{d\theta_{sdk}}{dt} + \theta_{sdk} = K_{t,1} \theta_{dgcp} + K_{t,2} \theta_w, \quad (13)$$

$$\text{де } \tau_{\theta 1} = \frac{1}{k_{dg}}, K_{\theta 1} = \frac{k_{sdk}}{k_{dg}}, K_u = \frac{k_u}{k_{dg}}; \tau_{t,1} = \frac{1}{k_{t,2}}, K_{t,1} = \frac{k_{t,1}}{k_{t,2}}, K_{t,2} = \frac{k_{t,3}}{k_{t,2}}.$$

Оскільки рівняння (6) – (10) записані у відхиленнях від своїх базових значень, то їх початкові умови – нульові.

Рівняння (6) – (8) та (12) і (13) перетворимо за Лапласом, враховуючи нульові початкові умови.

Отже,

$$(\tau_n s + 1 + k_{\theta n}) \theta_n^{out}(s) = (k_{\theta n} - 1 - \tau_n s) \theta_n^{in}(s) + \theta_{sz}(s) + k_g g_n(s), \quad (14)$$

$$(\tau_w s + 1) \theta_w(s) = k_{sdk} \theta_{sdk}(s) + k_{sz} \cdot \theta_{sz}(s), \quad (15)$$

$$(\tau_{sz} s + 1) \theta_{sz}(s) = k_{wep} \theta_w(s) + k_{nep} \theta_{ncp}(s), \quad (16)$$

$$(\tau_{\theta 1} s + 1) \theta_{dg\uparrow}(s) = K_{\theta 1} \theta_{sdk}(s) + K_u u(s), \quad (17)$$

$$(\tau_{t,1} s + 1) \theta_{sdk}(s) = K_{t,1} \theta_{dg}(s) + K_{t,2} \theta_w(s), \quad (18)$$

Оскільки вхідними величинами об'єкта є керуюча дія u та збурення θ_n^{in} і g_n , а виходи - θ_n^{out} , θ_w , $\theta_{dg\uparrow}$, то із системи рівнянь (14) – (18) вилучимо проміжні змінні θ_{sz} , θ_{sdk} і θ_{ncp} . Із рівняння (16) знайшли

$$\theta_{sz}(s) = \frac{k_{wep}}{\tau_{sz} s + 1} \theta_w(s) + \frac{k_{nep}}{\tau_{sz} s + 1} \theta_{ncp}(s). \quad (19)$$

Отримане значення $\theta_{sz}(s)$ підставили в рівняння (14), що дасть такий результат:

$$(\tau_n s + 1 + k_{\theta n}) \theta_n^{out}(s) = (k_{\theta n} - 1 - \tau_n s) \theta_n^{in}(s) + \frac{k_{wep}}{\tau_{sz} s + 1} \theta_w(s) + \frac{k_{nep}}{\tau_{sz} s + 1} \theta_{ncp}(s) + k_g g_n(s).$$

Після врахування значення $\theta_{ncp}(s)$ із формули (11), отримали

$$\left(\tau_n s + 1 + k_{\theta n} - \frac{0,5k_{nep}}{\tau_{sz} s + 1} \right) \theta_n^{out}(s) - \frac{k_{wep}}{\tau_{sz} s + 1} \theta_w(s) = \left(k_{\theta n} - 1 - \tau_n s + \frac{0,5k_{nep}}{\tau_{sz} s + 1} \right) \theta_n^{in}(s) + k_g g_n(s). \quad (20)$$

Із рівняння (18) знайшли

$$\theta_{sdk}(s) = \frac{K_{t,1}}{\tau_{t,1}s+1} \theta_{dg\uparrow}(s) + \frac{K_{t,2}}{\tau_{t,1}s+1} \theta_w(s). \quad (21)$$

З врахуванням формул (19), (20) і (11) рівняння (15) набуло такого вигляду:

$$-\frac{0,5k_{sz}k_{nep}}{\tau_{sz}s+1} \theta_n^{out} + \left(\tau_w s + 1 - \frac{k_{sdk}K_{t,2}}{\tau_{t,1}s+1} - \frac{k_{sz}k_{wep}}{\tau_{sz}s+1} \right) \theta_w(s) - \frac{k_{sdk}K_{t,1}}{\tau_{t,1}s+1} \theta_{dg\uparrow}(s) = \frac{0,5k_{sz}k_{nep}}{\tau_{sz}s+1} \theta_n^{in}. \quad (22)$$

Оскільки рівняння (17) включає в себе раніше знайдену величину $\theta_{sdk}(s)$, то з врахуванням значення $\theta_{sdk}(s)$ будемо мати

$$-\frac{K_{\theta,1}K_{t,2}}{\tau_{t,1}s+1} \theta_w(s) + \left(\tau_{\theta,1}s + 1 - \frac{K_{\theta,1}K_{t,1}}{\tau_{t,1}s+1} \right) \theta_{dg\uparrow}(s) = K_u u(s). \quad (23)$$

Рівняння (20), (22) і (23) утворюють математичну модель нагрівника, яка не вміщує проміжних змінних.

Ведемо такі позначення:

$$\begin{aligned} a_{11}(s) &= \tau_n s + 1 + k_{\theta n} - \frac{0,5k_{nep}}{\tau_{sz}s+1}; & a_{12}(s) &= -\frac{k_{wep}}{\tau_{sz}s+1}, & a_{13}(s) &= 0; \\ a_{21}(s) &= -\frac{0,5k_{sz}k_{nep}}{\tau_{sz}s+1}; & a_{22}(s) &= \tau_w s + 1 - \frac{k_{sdk}K_{t,2}}{\tau_{t,1}s+1} - \frac{k_{sz}k_{wep}}{\tau_{sz}s+1}; & a_{23}(s) &= -\frac{k_{sdk}K_{t,1}}{\tau_{t,1}s+1}; \\ a_{31}(s) &= 0; & a_{32}(s) &= -\frac{K_{\theta,1}K_{t,2}}{\tau_{t,1}s+1}; & a_{33}(s) &= \tau_{\theta,1}s + 1 - \frac{K_{\theta,1}K_{t,1}}{\tau_{t,1}s+1}; \\ b_{11}(s) &= k_{\theta n} - 1 - \tau_n s + \frac{0,5k_{nep}}{\tau_{sz}s+1}; & b_{12}(s) &= k_g, & b_{13}(s) &= 0; \\ b_{22}(s) &= b_{23}(s) = 0; & b_{21}(s) &= \frac{0,5k_{sz}k_{nep}}{\tau_{sz}s+1}; \\ b_{31}(s) &= b_{32}(s) = 0, & b_{33}(s) &= K_u, \end{aligned}$$

З врахуванням прийнятих позначень математична модель нагрівача буде такою:

$$a_{11}(s) \theta_n^{out}(s) + a_{12}(s) \theta_w(s) = b_{11}(s) \theta_n^{in}(s) + b_{12}(s) g_n(s), \quad (24)$$

$$a_{21}(s) \theta_n^{out}(s) + a_{22}(s) \theta_w(s) + a_{23}(s) \theta_{dg\uparrow}(s) = b_{21}(s) \theta_n^{in}(s). \quad (25)$$

$$a_{32}(s) \theta_w(s) + a_{33}(s) \theta_{dg\uparrow}(s) = b_{33}(s) u(s). \quad (26)$$

Систему рівнянь (24) – (26) запишисали у матрично-векторній формі

$$A(s) \bar{X}(s) = B(s) \bar{U}(s), \quad (27)$$

$$\text{де } A(s) = \begin{bmatrix} a_{11}(s) & a_{12}(s) & 0 \\ a_{21}(s) & a_{22}(s) & a_{23}(s) \\ 0 & a_{32}(s) & a_{33}(s) \end{bmatrix}, \quad B(s) = \begin{bmatrix} b_{11}(s) & b_{12}(s) & 0 \\ b_{21}(s) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & b_{33}(s) \end{bmatrix},$$

$$\bar{X}(s) = \begin{bmatrix} \theta_n^{out}(s) \\ \theta_w(s) \\ \theta_{dg\uparrow}(s) \end{bmatrix}, \quad \bar{U}(s) = \begin{bmatrix} \theta_n^{in}(s) \\ g_n(s) \\ u(s) \end{bmatrix}.$$

Із матрично-векторного рівняння (27) знайшли

$$\bar{X}(s) = A^{-1}(s)B(s)\bar{U}(s), \quad (28)$$

Після виконання відповідних дій над матрицями в рівнянні (28) прийшли до такого результату:

$$\theta_n^{out}(s) = -\frac{1}{\Delta(s)} \left((a_{12}(s)a_{33}(s)b_{21}(s) - b_{11}(s)(a_{22}(s)a_{33}(s) - a_{23}(s)a_{32}(s)))\theta_n^{in}(s) + (b_{12}(s)(a_{23}(s)a_{32}(s) - a_{22}(s)a_{33}(s)))g_n(s) - a_{12}(s)a_{23}(s)b_{33}(s)u(s) \right), \quad (29)$$

$$\theta_w(s) = \frac{1}{\Delta(s)} \left((b_{11}(s)a_{21}(s)a_{33}(s) - b_{21}(s)a_{11}(s)a_{33}(s))\theta_n^{in}(s) + b_{12}(s)a_{21}(s)a_{33}(s)g_n(s) + b_{33}(s)a_{11}(s)a_{23}(s)u(s) \right), \quad (30)$$

$$\theta_{dg\uparrow}(s) = \frac{1}{\Delta(s)} \left((b_{21}(s)a_{11}(s)a_{32}(s) - b_{11}(s)a_{21}(s)a_{32}(s))\theta_n^{in}(s) - b_{12}(s)a_{21}(s)a_{32}(s)g_n(s) + b_{33}(s)(a_{12}(s)a_{21}(s) - a_{11}(s)a_{22}(s))u(s) \right), \quad (31)$$

де

$$\Delta(s) = a_{11}(s)a_{23}(s)a_{32}(s) - a_{11}(s)a_{22}(s)a_{33}(s) + a_{12}(s)a_{21}(s)a_{33}(s). \quad (32)$$

Вирази (29) – (31) дають змогу знайти передавальні функції об'єкта відносно вхідних величин

θ_n^{out} , θ_w , $\theta_{dg\uparrow}$ за всіма вихідними величинами u , θ_n^{in} і g_n .

Ввели такі позначення:

$$W_{11}(s) = \frac{1}{\Delta(s)} \left(a_{12}(s)a_{33}(s)b_{21}(s) - b_{11}(s)(a_{22}(s)a_{33}(s) - a_{23}(s)a_{32}(s)) \right); \quad (33)$$

$$W_{12}(s) = \frac{1}{\Delta(s)} b_{12}(s)(a_{23}(s)a_{32}(s) - a_{22}(s)a_{33}(s)); \quad (34)$$

$$W_{13}(s) = -\frac{1}{\Delta(s)} a_{12}(s)a_{23}(s)b_{33}(s); \quad (35)$$

$$W_{21}(s) = \frac{1}{\Delta(s)} (b_{11}(s)a_{21}(s)a_{33}(s) - b_{21}(s)a_{11}(s)a_{33}(s)); \quad (36)$$

$$W_{22}(s) = \frac{1}{\Delta(s)} b_{12}(s)a_{21}(s)a_{33}(s); \quad (37)$$

$$W_{23}(s) = \frac{1}{\Delta(s)} b_{33}(s)a_{11}(s)a_{23}(s); \quad (38)$$

$$W_{31}(s) = \frac{1}{\Delta(s)} (b_{21}(s)a_{11}(s)a_{32}(s) - b_{11}(s)a_{21}(s)a_{32}(s)); \quad (39)$$

$$W_{32}(s) = -\frac{1}{\Delta(s)} b_{12}(s)a_{21}(s)a_{32}(s); \quad (40)$$

$$W_{33}(s) = \frac{1}{\Delta(s)} b_{33}(s)(a_{12}(s)a_{21}(s) - a_{11}(s)a_{22}(s)). \quad (41)$$

Після прийнятих позначень формули (29) – (31) набули такого вигляду:

$$\theta_n^{out}(s) = W_{11}(s)\theta_n^{in}(s) + W_{12}(s)g_n(s) + W_{13}(s)u(s)$$

$$\begin{aligned}\theta_w(s) &= W_{21}(s)\theta_n^{in}(s) + W_{22}(s)g_n(s) + W_{23}(s)u(s), \\ \theta_{dg\uparrow}(s) &= W_{31}(s)\theta_n^{in}(s) + W_{32}(s)g_n(s) + W_{33}(s)u(s).\end{aligned}$$

Аналіз передавальних функцій (33) – (41) показав, що їх як чисельники, так і знаменники – це відношення двох поліномів. Чисельники і знаменники передавальних функцій нагрівника запишемо у такому вигляді:

$$\text{num}W_{ij}(s) = \frac{R_{ij}(s)}{Q_{ij}(s)}, \Delta(s) = \text{denom}W_{ij}(s) = \frac{R_{\Delta}(s)}{Q_{\Delta}(s)}. \text{Тоді}$$

$$W_{ij}(s) = \frac{R_{ij}(s)}{Q_{ij}(s)} \cdot \frac{Q_{\Delta}(s)}{R_{\Delta}(s)}, i, j = 1, 2, 3. \quad (42)$$

Якщо врахувати значення відповідних поліномів, що входять до передавальної функції $W_{ij}(s)$ то отримаємо такий вираз:

$$W_{ij}(s) = \frac{\sum_{k=0}^{n_1} \beta_k^{(ij)} s^{n_1-k}}{\sum_{l=0}^{m_1} \alpha_l^{(ij)} s^{m_1-l}} \cdot \frac{\sum_{l=0}^m \alpha_l s^{m-l}}{\sum_{k=0}^n \beta_k s^{n-k}},$$

де $\alpha_l^{(ij)}$, $\beta_k^{(ij)}$, α_l , β_k - коефіцієнти поліномів $Q_{ij}(s)$, $R_{ij}(s)$, $Q_{\Delta}(s)$ і $R_{\Delta}(s)$; n_1 , m_1 , n , m - порядки поліномів $Q_{ij}(s)$, $R_{ij}(s)$, $Q_{\Delta}(s)$ і $R_{\Delta}(s)$.

Оскільки чисельник і знаменник передавальної функції $W_{ij}(s)$ це добуток двох поліномів, то

$$W_{ij}(s) = \frac{\sum_{k=0}^M B_k^{(ij)} s^{M-k}}{\sum_{l=0}^N A_l^{(ij)} s^{N-l}}, i, j = 1, 2, 3, \quad (43)$$

де

$$M = \text{deg}(Q_{\Delta}(s)) + \text{deg}(R_{ij}(s)); N = \text{deg}(Q_{ij}(s)) + \text{deg}(R_{\Delta}(s)), \quad (44)$$

де $\text{deg}(\square)$ - порядок полінома.

Коефіцієнти $B_k^{(ij)}$, $k = \overline{0, M}$ і $A_l^{(ij)}$, $l = \overline{0, N}$ визначили за такими формулами:

$$B_k^{(ij)} = \sum_{p=0}^k \alpha_p \beta_{k-p}^{(ij)}, A_l^{(ij)} = \sum_{p=0}^l \beta_p \alpha_{l-p}^{(ij)}. \quad (45)$$

У тому випадку, коли індекси величин α_p ($\alpha_{k-p}^{(ij)}$) і β_p ($\beta_{k-p}^{(ij)}$) перевищують свої граничні значення відповідні коефіцієнти у формулі (44) прирівнюються до нуля.

Для визначення порядків чисельників і знаменників передавальних функцій $W_{ij}(s)$, $i = \overline{1, 3}$, $j = \overline{1, 3}$ скористаємося співвідношеннями (44). Результати розрахунків зведені в табл. 1.

Таблиця 1.

Порядки чисельників і знаменників передавальних функцій $W_{ij}(s)$, $i = \overline{1, 3}$, $j = \overline{1, 3}$

Порядки чисельників і знаменників ПФ	$W_{11}(s)$	$W_{12}(s)$	$W_{13}(s)$	$W_{21}(s)$	$W_{22}(s)$	$W_{23}(s)$	$W_{31}(s)$	$W_{32}(s)$	$W_{33}(s)$
M	7	6	2	4	4	4	2	2	6
N	7	7	7	7	7	7	7	7	7

Аналіз значень M і N (табл. 1) показує, що передавальні функції $W_{ij}(s)$, $i = \overline{1, 3}$, $j = \overline{1, 3}$

нагрівника, для яких виконується умова $M \leq N$ мають фізичну реалізацію, що відповідає фізичній сутності процесу нагріву нафти. Крім того отримана математична модель нагрівника у вигляді передавальних функцій є основою для створення ефективних систем керування процесом нагрівання рідин в нафтовій і газовій промисловості.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

1. Виходячи із допущення, що відхилення вихідних величин нелінійної математичної моделі нагрівника від своїх базових значень невеликі, отримана лінеаризована математична модель нагрівника, яка описується системою п'яти лінійних диференціальних рівнянь.
2. Синтезовані передавальні функції нагрівника у термінах «вхід-вихід» у вигляді відношення двох поліномів і показано, що порядки поліномів чисельника не більше порядків полінома знаменника, що відповідає фізичній сутності процесу нагріву нафти.
3. Отримана лінеаризована математична модель процесу нагріву нафти в шляховому нагрівнику є основою для створення ефективної системи автоматичного керування процесом нагріву нафти.

Література

1. Gas fired water bath heaters. URL: <https://epcmholdings.com/gas-fired-water-bathheaters>.
2. Розробка та експлуатація нафтових та нафтогазових родовищ: навчальний посібник / Фик М. І., Хрїпко О. І., Раєвський Я. О., Варавіна О. П. Харків: «ХП», 2019. 149 с.
3. Горбійчук М. І., Когуляк М. І., Гарасимів В. М. Математична модель підігрівника з проміжним теплоносієм Методи та прилади контролю якості. Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2021. №2(47). С. 83-96.
4. Barreto C.V, Pires Luis F. G., Sarmento R. C. Transient simulation of natural gas citygates stations. Proceedings of the 8th International Pipeline Conference IPC2010 September 27-October 1, 2010, Calgary, Alberta, Canada. URL: <http://www.simdut.com.br/Trabalhos/IPC2010-31567.pdf>.
5. Rashidmardani A., Hamzei M. Effect of Various Parameters on Indirect Fired Water Bath Heaters' Efficiency to Reduce Energy Losses. International Journal of Science and Engineering Investigations, 2013. Vol. 2, issue 12. P.17-25.
6. Azizi S. H., Rashidmardani A., Andalibi M. R. Study of Preheating Natural Gas in Gas Pressure Reduction Station by the Flue Gas of Indirect Water Bath Heater. International Journal of Science and Engineering Investigations, 2014. Vol. 3, issue 27. P.17-22. URL: <http://www.ijsei.com/papers/ijsei-32714-03.pdf> ISSN: 2251-8843.
7. Khanmohammadi S., Shahsavari A. Thermodynamic assessment and proposal of new configurations of an indirect water bath heater for a City Gate Station (a case study). Energy Equip. Sys, 2020. Vol. 8. No. 4. Dec. 2020. P. 349-365. URL: http://www.energyequipsys.com/article_241292_f1fc67b732305a7108c69cf11f6cab0d.pdf.
8. Riahi M., Yazdirad B., Jadidi M., Berenjkar F., Khoshnevisan S., Jamali M., Safary M. Optimization of Combustion Efficiency in Indirect Water Bath Heaters of Ardabil City Gate Stations. MCS 7 Chia Laguna, Cagliari, Sardinia, Italy, September 11-15, 2011. URL: https://www.researchgate.net/publication/272498858_Optimization_of_Combustion_Efficiency_in_Indirect_Water_Bath_Heaters_of_Ardabil_City_Gate_Stations.
9. Rastegar S., Kargarsharifabad H., Doost A.K., Rahbar N. Developing a Model for Predicting the Outlet Gas Temperature of Natural Gas Pressure Reduction Stations to Reduce Energy Loss. Journal of Heat and Mass Transfer Research 7, 2020. P.143 - 154. URL: https://jhmtr.semnan.ac.ir/article_4469_339ae1dfdccb8b200ef6dbcf8e8abfe.pdf.

References

1. Gas fired water bath heaters. URL: <https://epcmholdings.com/gas-fired-water-bathheaters>.

2. Rozrobka ta ekspluatatsiia naftovykh ta naftohazovykh rodovyshch: navchalnyi posibnyk / Fyk M. I., Khripko O. I., Raievskiy Ya. O., Varavina O. P. Kharkiv: «KhPl», 2019. 149 s.
3. Horbiichuk M. I., Kohutiak M. I., Harasymiv V. M. Matematychna model pidhrivnyka z promizhnym teplonosiiem Metody ta pryklady kontroliu yakosti. Ivano-Frankivsk: IFNTUNH, 2021. №2(47). S. 83-96.
4. Barreto C.V, Pires Luis F. G., Sarmiento R. C. Transient simulation of natural gas citygates stations. Proceedings of the 8th International Pipeline Conference IPC2010 September 27-October 1, 2010, Calgary, Alberta, Canada. URL: <http://www.simdut.com.br/Trabalhos/IPC2010-31567.pdf>.
5. Rashidmardani A., Hamzei M. Effect of Various Parameters on Indirect Fired Water Bath Heaters Efficiency to Reduce Energy Losses. International Journal of Science and Engineering Investigations, 2013. Vol. 2, issue 12. P.17-25.
6. Azizi S. H., Rashidmardani A., Andalibi M. R. Study of Preheating Natural Gas in Gas Pressure Reduction Station by the Flue Gas of Indirect Water Bath Heater. International Journal of Science and Engineering Investigations, 2014. Vol. 3, issue 27. P.17-22. URL: <http://www.ijsei.com/papers/ijsei-32714-03.pdf> ISSN: 2251-8843.
7. Khanmohammadi S., Shahsavari A. Thermodynamic assessment and proposal of new configurations of an indirect water bath heater for a City Gate Station (a case study). Energy Equip. Sys, 2020. Vol. 8. No. 4. Dec. 2020. P. 349-365. URL: http://www.energyequipsys.com/article_241292_f1fc67b732305a7108c69cf11f6cab0d.pdf.
8. Riahi M., Yazdirad B., Jadidi M., Berenjkari F., Khoshnevisan S., Jamali M., Safary M. Optimization of Combustion Efficiency in Indirect Water Bath Heaters of Ardabil City Gate Stations. MCS 7 Chia Laguna, Cagliari, Sardinia, Italy, September 11-15, 2011. URL: https://www.researchgate.net/publication/272498858_Optimization_of_Combustion_Efficiency_in_Indirect_Water_Bath_Heaters_of_Ardabil_City_Gate_Stations.
9. Rastegar S., Kargarsharifabad H., Doost A.K., Rahbar N. Developing a Model for Predicting the Outlet Gas Temperature of Natural Gas Pressure Reduction Stations to Reduce Energy Loss. Journal of Heat and Mass Transfer Research 7, 2020. P.143 - 154 . URL : https://jhmr.semnan.ac.ir/article_4469_339ae1dfdccab8b200ef6dbcf8e8abfe.pdf.