

151 АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 622.24

doi: 10.31498/2225-6733.49.2.2024.321350

© Горбійчук М.І.¹, Василенчук М.З.², Когутяк М.І.³

ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ НЕПРЯМОГО НАГРІВНИКА НАФТИ ЯК ОБ'ЄКТА АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ

Шляхові нагрівники з проміжним теплоносієм широко використовують для попереднього нагріву нафти та газу з метою зменшення в'язкості нафти при її транспортуванні магістральними трубопроводами або для підігріву газу перед пониженням тиску для запобігання утворення гідратів, які утворюються в результаті ефекту Джоуля-Томпсона. Одним із основних елементів шляхового нагрівника є ванна циліндричної або прямокутної форми, заповнена звичайною водою або з домішками, в якій розміщений змійовик, по якому протікає робоче тіло (нафта). Зазвичай в непрямых нагрівниках використовується звичайна вода. Ванна з водою нагрівається димовими газами, які проходять через жарові труби. Димові гази можуть мати різне походження, такі як спалювання продуктів нафтопереробки, а саме газів після перегонки нафти. Жарові труби конструктивно з'єднані з камерою згорання, де спалюється природний газ. Отже, шляховий нагрівник з проміжним теплоносієм є складною динамічною системою, в якій тепло передається до робочого тіла (нафти) через ряд проміжних ланок. Створена математична модель динаміки шляхового нагрівника з проміжним теплоносієм враховує процеси послідовної передачі тепла від одного елемента до іншого. Кожний елемент в ланцюгу теплопередачі описується нелінійним диференціальним рівнянням, яке отримано на основі закону збереження енергії (тепла). Такий спосіб опису динаміки шляхового нагрівника породжує систему диференціальних рівнянь, в якій крім вхідних і вихідних величин є проміжні змінні, такі як температура проміжного середовища, тобто води, температура стінок змійовика тощо. Після лінеаризації системи диференціальних рівнянь були вилучені проміжні змінні, що дало змогу отримати лінеаризовану математичну модель нагрівника, яка є придатною для синтезу багатоконтурної системи автоматичного керування непрямим нагрівником.

Ключові слова: шляховий нагрівник нафти, математична модель, система автоматичного керування, лінеаризація, структурна схема.

M. Horbiichuk, M. Vasylenchuk, M. Kohutyak. Study of dynamic properties of an indirect oil heater as an object of automatic control. Intermediate heat transfer heaters are widely used for the preheating of oil and gas to reduce the viscosity of oil during its transportation through main pipelines or for heating gas before pressure reduction to prevent the formation of hydrates, which occur because of the Joule-Thomson effect. One of the main components of a heat transfer heater is a cylindrical or rectangular bath filled with plain water or water with additives, inside which a coil is placed, through which the

¹ д-р техн. наук, професор, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, м. Івано-Франківськ, ORCID: 0000-0002-8586-1883, mi_profqorb@ukr.net

² аспірант, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, м. Івано-Франківськ, ORCID: 0009-0008-9725-052X, mischa.blaster@gmail.com

³ канд. техн. наук, доцент, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, м. Івано-Франківськ, ORCID: 0000-0003-0026-7744, atp_kohutyak@ukr.net

working fluid (oil) flows. Typically, indirect heaters use plain water. The water bath is heated by flue gases passing through fire tubes. The flue gases may originate from various sources, such as the combustion of oil refining by-products, specifically gases after oil distillation. The fire tubes are structurally connected to the combustion chamber, where natural gas is burned. Thus, an intermediate heat transfer heater is a complex dynamic system in which heat is transferred to the working fluid (oil) through several intermediate stages. The created mathematical model of the dynamics of the heat transfer heater considers the sequential heat transfer processes from one element to another. Each element in the heat transfer chain is described by a nonlinear differential equation derived based on the law of energy (heat) conservation. This approach to describing the dynamics of the heat transfer heater generates a system of differential equations, which, in addition to input and output variables, also includes intermediate variables such as the temperature of the intermediate medium (water), the temperature of the coil walls, and so on. After linearizing the system of differential equations, the intermediate variables were eliminated, which made it possible to obtain a linearized mathematical model of the heater suitable for the synthesis of a multi-loop automatic control system for the indirect heater.

Keywords: road oil heater, mathematical model, automatic control system, linearization, structural diagram.

Постановка проблеми. Для зменшення в'язкості нафти перед її транспортуванням, її попередньо нагрівають. На сьогодні для нагріву нафти використовують непрямі нагрівники нафти, які, на відміну від прямого нагріву нафти, забезпечують рівномірний нагрів робочого продукту, що значно знижує ризики аварій.

Характерною особливістю непрямого нагрівника нафти є наявність ванни циліндричної або прямокутної форми, заповненої водою, у яку занурений змійовик, через який протікає робочий продукт (нафта). До ванни підводиться тепло, яке утворюється у результаті спалювання природного газу. Оскільки ванна має значні розміри, то нагрівник як об'єкт автоматичного керування має значну інерційність, що ускладнює автоматичне керування таким об'єктом у випадку застосування одноконтурної системи автоматичного керування.

Якість процесу керування можна значно покращити, якщо застосувати нові схемотехнічні рішення при синтезі системи автоматичного керування процесом нагріву нафти в непрямому нагрівнику нафти. Для вирішення поставленої задачі необхідно створити адекватну математичну модель шляхового нагрівника нафти, придатну для синтезу багатоконтурної системи автоматичного керування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Публікації за темою дослідження можна розділити на дві групи – «технологічні» і моделювання процесу нагріву в непрямих нагрівниках з метою синтезу систем автоматичного керування.

Непрямі нагрівники нафти і газу мають значну теплову інерцію, що спричиняє великі енергетичні затрати при виводі об'єкта на здатний тепловий режим. У роботі [1] досліджується вплив нанотрубок на коефіцієнт теплопередачі. Ефективність процесу додавання нанотрубок до води була перевірена при об'ємних частках 0,025, 0,05, 0,1, 0,2 і 0,3 і діаметром 20-30 нм. Результати досліджень показали, що коефіцієнт теплопередачі нанофлюїду зростає з температурою, але не показує істотних змін зі збільшенням об'ємної частки нанотрубок в рідині. Однак збільшення об'ємної частки нанотрубок збільшило коефіцієнт теплопередачі та коефіцієнт в'язкості. При об'ємній частці нанотрубок 0,025 ефективність процесу теплопередачі збільшилась на 48%.

У роботі [2] досліджено вплив ультразвуку на теплопередачу у шляховому нагрівнику газу. З цією метою випробування проводились у двох режимах – без вібрації та з вібрацією на різних рівнях потужності ультразвуку. Результати досліджень показали позитивний тепловий вплив ультразвукової вібрації на збільшення швидкості теплопередачі, який мав місце при менших витратах рідини та нижчих рівнях потужності нагрівника.

Непрямі нагрівники газу мають низький коефіцієнт корисної дії (ККД), який не перевищує 52% [3]. Для підвищення ККД авторами роботи [3] запропонована сонячна система для часткової компенсації тепловитрат. Така система має у своєму складі сонячні колектори з накопичувальним баком, яка була доповнена циклом нагрівання повітря для горіння димовими газами.

Удосконалена система непрямого нагріву газу здатна заощадити до 39000 нм³ природного газу на рік.

У статті [4] отримана математична модель статичного режиму непрямого нагрівника для станції зниження тиску природного газу. За допомогою рівнянь збереження маси та енергії були оцінені ККД та витрата паливного газу в залежності від температури навколишнього середовища, геометрії нагрівника та характеристик природного газу, включаючи тиск, температуру та його склад. З використанням математичної моделі автори роботи [4] провели розрахунки, які дали змогу виявити, що зниження температури і підвищення тиску вхідного газу, потовщення ізоляції зі зловати і збільшення радіусу жарової труби призвели до збільшення теплового ККД нагрівника з 20 до 60% і, як наслідок, зменшилася витрата палива нагрівника.

У транспортному трубопроводі перед зниженням тиску природного газу необхідний попередній підігрів, щоб запобігти утворенню гідратів [5]. Для цієї мети використовується непрямий нагрівник з водяною банею. Результати термодинамічного моделювання [5] показують, що використання вихлопних продуктів згоряння для попереднього підігріву повітря для горіння може підвищити термічний ККД системи з 46,36% (для базового варіанту) до 73,84%.

Таким чином, у роботах [1-5] досліджувались різні аспекти підвищення ККД шляхових нагрівників природного газу, що пояснюється використанням комерційного газу для нагріву водяної ванни нагрівника. При нагріванні нафти шляховими нагрівниками на газових промислах використовують попутний газ, який не обліковується, що і зумовлює відсутність публікацій за тематикою підвищення ККД непрямих нагрівників нафти.

Один з підходів оптимізації водяних банних нагрівачів представлено у статті [6], де пропонується використання закручених труб, що дозволяє скоротити довжину газової труби на 12,5-25% порівняно з прямими конфігураціями, залежно від ступеня закрутки. Це рішення також сприяє збільшенню коефіцієнта теплопередачі та тиску в системі.

Дослідження [7] зосереджене на аналізі корозійних процесів у непрямих нагрівачах. За допомогою оцінки механічних характеристик, сканувальної електронної мікроскопії та рентгенівської дифракції автори виявили основні причини корозії стінок труб і корпусу нагрівача. Результати підкреслюють важливість підтримання оптимального рівня робочої рідини у ванні нагрівача для запобігання корозії.

У роботі [8] досліджується вплив застосування турбуленторів у водяних нагрівачах. Встановлено, що їх використання покращує теплопередачу на 20%, підвищує швидкість потоку рідини в котушці та збільшує середнє число Нуссельта. Завдяки цьому можна зменшити габарити нагрівача або знизити кількість використовуваного палива для підігріву основного продукту. Однак у дослідженні не враховано вплив зовнішніх факторів, які можуть змінювати температуру рідини, що в свою чергу вплине на ефективність турбуленторів.

Статті [9, 10] присвячені аналізу індуктивному нагріванню сировини та оцінці ефективності такого нагрівання. Недоліком даних досліджень є відсутність врахування використання газів, які виділяються при перегонці сировини.

Другий напрям досліджень присвячений математичному моделюванню і синтезу систем автоматичного керування процесом нагрівання нафти в шляхових нагрівниках.

У роботі [11] на основі законів збереження кількості речовини і енергії отримана математична модель динаміки шляхового нагрівника нафти у термінах «вхід-вихід», яка придатна для синтезу автоматичної системи керування. Недоліком отриманої моделі є те, що однією із її вихідних координат є температура води, яка, по суті, є проміжною координатою в моделі динаміки.

Спалювання природного газу на газових станціях, оснащених непрямими нагрівниками, створює проблеми, пов'язані з забрудненням навколишнього середовища [12]. Зменшити шкідливі викиди можна впровадженням ефективних систем керування процесом нагрівання нафти і газу в шляхових нагрівниках. Так, у роботі [12] процедура автоматичного керування здійснюється шляхом проектування системи керування для отримання прийнятної температури на виході нагрівника на основі умов входу газу до міської станції. Контролер розраховує температуру гідратуутворення в перерахунку на тиск газу на вході нагрівника і передає цю інформацію на факел горілки нагрівника для регулювання витрати палива. Аналіз результатів показує, що використання запропонованої системи призводить до максимального відносного приросту ефективності нагрівника на 28,54% порівняно зі звичайною системою.

Проведений аналіз літературних джерел показує, що актуальною науковою задачею є створення математичних моделей шляхових нагрівників нафти, придатних для створення ефективних систем автоматичного керування.

Мета роботи – математичне моделювання динаміки шляхового нагрівника нафти з проміжним теплоносієм в координатах «вхід-вихід» для отримання лінеаризованої моделі, придатної для синтезу ефективної системи керування тепловим процесом у шляховому нагрівнику нафти.

Виклад основного матеріалу. При транспортуванні нафти і природного газу їх попередньо підігрівають у нагрівниках з проміжним теплоносієм (непрямої дії) для зменшення в'язкості і запобігання гідратуутворення.

На рис. 1 зображена спрощена функціональна схема нагрівника нафти [12], який має циліндричну або прямокутну форму. Проміжним теплоносієм є вода, яка заповнює ванну 1. У водяну ванну занурені теплообмінні труби 2, по яких протікає робоче середовище (нафта). Нижня частина корпусу 1 нагрівника містить жарові труби 5, які також омиваються водою.

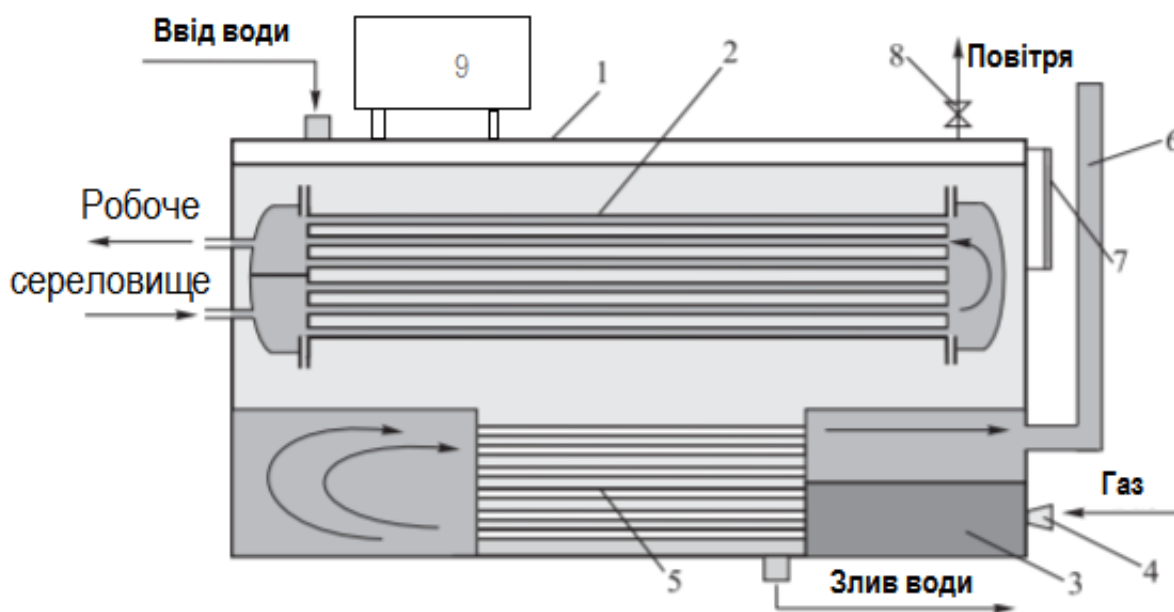


Рис. 1 – Функціональна схема нагрівника

Жарові труби з'єднані з камерою згорання 3, в якій розміщені форсунки 4 для спалювання природного газу. До камери згорання примикає вихлопна труба 6, по якій відводяться продукти згорання. По жаровим трубам рухаються гарячі продукти згорання, тепло від яких через стінки передається воді, яка нагрівається до температури не більше ніж 95°C. Контроль за рівнем води у ванні здійснюється візуально за допомогою мірного скла 7. До корпусу 1 може кріпитись розширювальний бачок 9.

На основі аналізу роботи нагрівника (рис. 1) з проміжним теплоносієм [12], як об'єкта автоматичного керування, створена його структурно-параметрична схема (рис. 2).

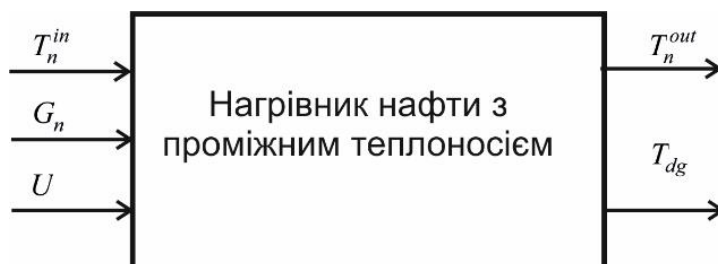


Рис. 2 – Структурно-параметрична схема нагрівника як об'єкта керування

Групу вхідних величин утворюють – температура нафти T_n^{in} на вході в нагрівник, масова витрата нафти G_n та керуюча дія U , сигнал який поступає на виконавчий пристрій, що подачу палива до форсунок нагрівника. Вихідними величинами об'єкта є температура нафти T_n^{out} на виході нагрівника та температура димових газів T_{dg} .

Математичну модель нагрівника з проміжним теплоносієм створена на основі аналізу руху теплових потоків у технологічному апараті (рис. 3).

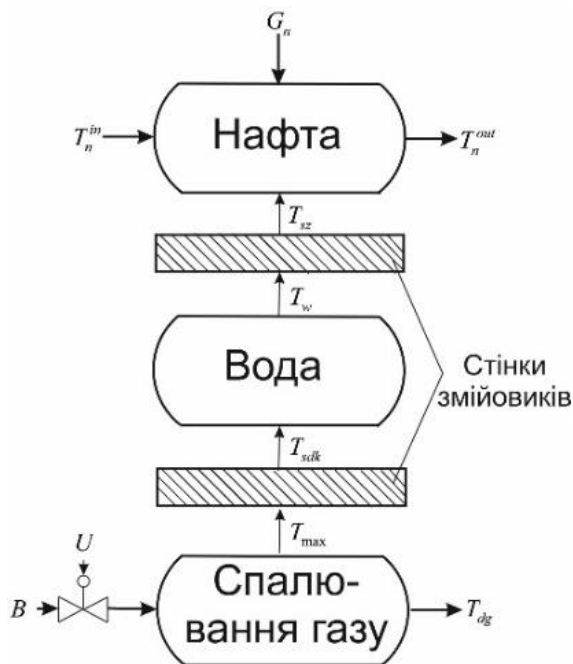


Рис. 3 – Схема теплових потоків нагрівника

Математична модель нагрівника [11, 13] отримана 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 підігрівника;

- 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.

З використанням рівняння теплового балансу в роботах [11, 13-14] отримані математичні моделі основних потоків тепла та стінок змійовиків (рис. 3).

Математична модель продукту (нафти) є такою:

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

де $\tau_n = \frac{M_n \cdot c_n}{c_{sz,n} \cdot F_z}$ – постійна часу; $k_{n,1} = \frac{c_n}{c_{sz,n} \cdot F_z}$,

$T_{ncp} = \frac{1}{2} (T_n^{in} + T_n^{out})$ – середня температура робочого середовища (нафти),

M_n – маса продукту (нафти) у змійовику; G_n – масова витрата продукту на вході в змійовик; c_n – середня теплоємність продукту.

T_{sz} – середня температура стінки змійовика підігріву;

C_{sz_n} – коефіцієнт теплопередачі від стінки до середовища, що нагрівається;

F_z – площа поверхні обміну змійовика.

Тепло від теплоносія (води) передається через стінку змійовика (рис. 3), яка є акумулятором теплової енергії, робочому середовищу (нафті). На основі закону збереження кількості тепла для стінки змійовика отримана така математична модель:

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

де

$$\tau_{sz} = \frac{M_z \cdot c_z}{(C_{w_sz} + C_{sz_n})}; \quad k_{wep} = \frac{C_{w_sz}}{C_{w_sz} + C_{sz_n}}; \quad k_{nep} = \frac{C_{sz_n}}{C_{w_sz} + C_{sz_n}};$$

T_w – температура проміжного теплоносія (води);

C_{w_sz} – коефіцієнт теплопередачі від води до стінки змійовика.

Вода, яка заповнює ванну нагрівника, передає тепло від жарових труб до продукту (рис. 3), який заповнює змійовик, розміщений у воді. Рівняння теплового балансу для води дає змогу отримати таку математичну модель:

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

де $\tau_w = \frac{M_w \cdot c_w}{C_{sdk_w} \cdot F_{dk} + F_z \cdot C_{w_sz}}$ – постійна часу;

$$k_{sdk} = \frac{C_{sdk_w} \cdot F_{dk}}{C_{sdk_w} \cdot F_{dk} + F_z \cdot C_{w_sz}}; \quad k_{sz} = \frac{C_{w_sz} \cdot F_z}{C_{sdk_w} \cdot F_{dk} + F_z \cdot C_{w_sz}}.$$

M_w – маса води у підігрівачі (у робочій точці при середній температурі 82,5°C);

c_w – теплоємність води;

T_{sdk} – температура стінки димового каналу

F_{dk} – площа поверхні димового каналу

C_{sdk_w} – коефіцієнт теплопередачі від стінки димового каналу до води.

Рівняння теплового балансу для продуктів згоряння є таким:

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

де $L_1 = V_{zdg} \rho_{cpdg} c_{cpdg}$; V_{zdg} – об'єм димового каналу нагрівника; ρ_{cpdg} – середня густина димових газів; c_{cpdg} – середня теплоємність димових газів; T_{dg} – температура димових газів; $k_1 = c_{dg} B_{max} (1 + \alpha L_0)$; $k_2 = 0,5 \cdot 10^{-8} (\epsilon_c + 1) C_0 F_{dk} \epsilon_{dg}$; $k_3 = 0,5 \cdot 10^{-8} (\epsilon_c + 1) C_0 F_{dk} A_{dg}$; $k_4 = 2,1 \cdot F_{dk}$; $k_5 = B_{max} \cdot \eta_T \cdot q_g^H$; c_{dg} – теплоємність димових газів на виході із камери згорання; $\beta(U)$ – витратна характеристика регулюючого клапана (прийmemo її лінійною); $B_{max} = \frac{1}{\beta(U^0)} B_0$ – максимальна витрата паливного газу; $\beta(U^0) = 0,6$ – ступінь відкриття клапана в робочій точці; U – керуюча дія на клапан подачі паливного газу; $B_0 = \frac{G_{no} \cdot c_n (T_{no}^{out} - T_{no}^{in})}{q_g^H \cdot \eta_n}$; q_g^H – те-

плота згорання паливного газу; η_n – коефіцієнт корисної дії підігрівника (індекси «0» при відповідних змінних вказують на їх значення в усталеному режимі); α – коефіцієнт співвідношення паливо/повітря; L_0 – кількість повітря, що витрачається на спалювання одиниці маси природного газу; ϵ_c – ступінь чорноти поверхні стінки газоходу; C_0 – коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла; ϵ_{dk} – ступінь чорноти димових газів при середній температурі газу; A_{dg} – ступінь чорноти димових газів при середній температурі газу та поглинаюча спроможність газу при температурі T_{sdk} поверхні каналу димових газів; η_T – коефіцієнт корисної дії топки.

Тепло, яке виділилось у результаті згорання природного газу через стінки жарової труби передається проміжному теплоносію (воді). Оскільки стінка має масу і кінцеву товщину, то її динамічні властивості будуть характеризуватись таким диференціальним рівнянням:

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

де M_{dk} – маса димового каналу; ψ – коефіцієнт, який враховує розподіл тепла в топці за довжиною факелу; T_{max} – максимальна розрахункова температура горіння.

Рівняння (1)-(5) розіб'ємо на дві групи: у першу групу включимо рівняння, ліві частини яких вміщують основні змінні (вихідні величини), а другу групу утворимо із рівнянь, права частина яких – допоміжні змінні (рис. 2). Отже,

$$\tau_n \frac{dT_{ncp}}{dt} + T_{ncp} = -k_{n,1} G_n (T_n^{out} - T_n^{in}) + k_{n,2} T_{sz}, \quad (6)$$

$$\frac{dT_{dg}}{dt} = \frac{1}{0,5L_1} \left((-k_1 \cdot T_{dg} + k_5) \cdot G(U) - k_2 \left(0,5(T_{max} + T_{dg}) \right)^4 + k_3 (T_{sdk})^4 - k_4 (0,5(T_{max} + T_{dg}) - T_{sdk})^{5/4} \right), \quad (7)$$

$$\tau_{sz} \frac{dT_{sz}}{dt} + T_{sz} = k_{wep} T_w + k_{nep} T_{ncp}, \quad (8)$$

$$\tau_w \frac{dT_w}{dt} + T_w = k_{sdk} T_{sdk} + k_{sz} T_{sz}, \quad (9)$$

$$\frac{d}{dt} T_{sdk} = \frac{1}{M_{dk} c_{dk}} \left(0,5 \cdot \psi \cdot (\varepsilon_c + 1) C_0 F_{dk} \left[\varepsilon_{dg} \left(\frac{T_{max} + T_{dg}^{\uparrow}}{200} \right)^4 - A_{dg} \left(\frac{T_{sdk}}{100} \right)^4 \right] + 2,1 \cdot F_{dk} \cdot \sqrt[4]{(0,5(T_{max} + T_{dg}^{\uparrow}) - T_{sdk}) \cdot (0,5(T_{max} + T_{dg}^{\uparrow}) - T_{sdk}) - C_{sdk-w} \cdot F_{dk} \cdot (T_{sdk} - T_w)} \right). \quad (10)$$

Для диференціальних рівнянь (6)-(10) початковими умовами будуть усталені значення як вхідних, так і вихідних величин (рис. 2), які будемо позначати рядом з існуючими індексами додатковим індексом «0».

Відмітимо, рівняння (8) і (9) – лінійні відносно своїх змінних.

Рівняння (6), (9) і (10) лінеаризуємо: позначимо через θ (з відповідними індексами) відхилення вхідних і вихідних температур від своїх усталених значень. Інші позначення є такими: $u = \Delta U$, $g_n = \Delta G_n$, де $\Delta U = U - U_0$, $\Delta G_n = G_n - G_{n0}$.

Після проведення операції лінеаризації [2, 3] отримаємо таку систему диференціальних рівнянь:

$$(\tau_n s + 1 + k_{\theta n}) \theta_n^{out}(s) = (k_{\theta n} - 1 - \tau_n s) \theta_n^{in}(s) + 2\theta_{sz}(s) + k_g g_n(s), \quad (11)$$

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

$$(\tau_{sz} s + 1) \theta_{sz}(s) = k_{wep} \theta_w(s) + 0,5 k_{nep} (\theta_n^{in}(s) + \theta_n^{out}(s)), \quad (13)$$

$$(\tau_w s + 1) \theta_w(s) = k_{sdk} \theta_{sdk}(s) + k_{sz} \theta_{sz}(s), \quad (14)$$

$$(\tau_{t,1} s + 1) \theta_{sdk}(s) = K_{t,1} \theta_{dg}(s) + K_{t,2} \theta_w(s), \quad (15)$$

$$\text{де } \tau_{\theta 1} = \frac{0,5L_1}{k_{\theta,1}}; \quad K_{\theta,1} = \frac{k_{\theta,2}}{k_{\theta,1}}; \quad K_u = \frac{k_u}{k_{\theta,1}}; \quad \tau_{t,1} = \frac{M_{dk} c_{dk}}{k_{t,1}}; \quad K_{t,1} = \frac{k_{t,2}}{k_{t,1}}; \quad K_{t,2} = \frac{k_{t,3}}{k_{t,1}}; \quad k_g = \left(\frac{\partial \varphi_0}{\partial G_n} \right)_0;$$

$$k_{\theta n} = \left(\frac{\partial \varphi_0}{\partial T_n^{out}} \right)_0 = - \left(\frac{\partial \varphi_0}{\partial T_n^{in}} \right)_0; \quad k_{\theta,1} = - \left(\frac{\partial \varphi_1}{\partial T_{dg\uparrow}} \right)_0; \quad k_{\theta,2} = \left(\frac{\partial \varphi_1}{\partial T_{sdk}} \right)_0; \quad k_u = \left(\frac{\partial \varphi_1}{\partial U} \right)_0; \quad k_{t,1} = - \left(\frac{\partial \varphi_2}{\partial T_{dg\uparrow}} \right)_0;$$

$$k_{t,2} = \left(\frac{\partial \varphi_2}{\partial T_{sdk}} \right)_0; \quad k_{t,2} = \left(\frac{\partial \varphi_2}{\partial T_w} \right)_0; \quad \varphi_0 = -2k_{n,1} G_n (T_n^{out} - T_n^{in});$$

$$\varphi_1 = -k_1 \cdot \beta(U) \cdot (T_{dg\uparrow} - 273) - k_2 \left(0,5(T_{max} + T_{dg\uparrow}) \right)^4 + k_3 (T_{sdk})^4 - k_4 \cdot (0,5(T_{max} + T_{dg\uparrow}) - T_{sdk})^{5/4} + k_5 \cdot \beta(U),$$

$$\varphi_2 = 0,5 \cdot \psi \cdot (\varepsilon_c + 1) C_0 F_{dk} \left[\varepsilon_{dg} \left(\frac{T_{max} + T_{dg}^{\uparrow}}{200} \right)^4 - A_{dg} \left(\frac{T_{sdk}}{100} \right)^4 \right] + 2,1 \cdot F_{dk} \cdot$$

$$\sqrt[4]{(0,5(T_{max} + T_{dg}^{\uparrow}) - T_{sdk}) \cdot (0,5(T_{max} + T_{dg}^{\uparrow}) - T_{sdk}) - C_{sdk-w} \cdot F_{dk} \cdot (T_{sdk} - T_w)}.$$

Три останні рівняння (13)-(15) вміщують проміжні змінні θ_{sdk} , θ_w і θ_{sz} . Для їх визначення скористаємося системою рівнянь, яку утворимо із (13)-(15). Отже,

$$-k_{wep}\theta_w(s) + (\tau_{sz}s + 1)\theta_{sz}(s) = 0,5k_{nep}(\theta_n^{in}(s) + \theta_n^{out}(s)), \quad (16)$$

$$-k_{sdk}\theta_{sdk}(s) + (\tau_ws + 1)\theta_w(s) - k_{sz}\theta_{sz}(s) = 0, \quad (17)$$

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

Після введення позначень:

$$\alpha_{12} = -k_{wcp}; \alpha_{13} = \tau_{sz}s + 1;$$

$$\alpha_{21} = -k_{sdk}; \alpha_{22} = \tau_ws + 1; \alpha_{23} = -k_{sz};$$

$$\alpha_{31} = \tau_{t,1}s + 1; \alpha_{32} = -K_{t,2};$$

$$\alpha_{11} = 0; \alpha_{33} = 0; \pi_2 = 0;$$

$$\pi_1 = 0,5k_{nep}(\theta_n^{in}(s) + \theta_n^{out}(s));$$

$$\pi_3 = K_{t,1}\theta_{dg}(s)$$

система рівнянь (16)-(18) буде такою:

$$\alpha_{11}\theta_{sdk}(s) + \alpha_{12}\theta_w(s) + \alpha_{13}\theta_{sz}(s) = \pi_1,$$

$$\alpha_{21}\theta_{sdk}(s) + \alpha_{22}\theta_w(s) + \alpha_{23}\theta_{sz}(s) = \pi_2,$$

$$\alpha_{31}\theta_{sdk}(s) + \alpha_{32}\theta_w(s) + \alpha_{33}\theta_{sz}(s) = \pi_3.$$

Отриману систему рівнянь подамо у векторно-матричній формі

$$A\bar{\theta} = \bar{\pi}, \quad (19)$$

де

$$A = \begin{bmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} & \alpha_{13} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} & \alpha_{23} \\ \alpha_{31} & \alpha_{32} & \alpha_{33} \end{bmatrix}; \quad \bar{\theta} = \begin{bmatrix} \theta_{sdk} \\ \theta_w \\ \theta_{sz} \end{bmatrix}; \quad \bar{\pi} = \begin{bmatrix} \pi_1 \\ \pi_2 \\ \pi_3 \end{bmatrix}.$$

Із рівняння (19) знаходимо

$$\bar{\theta} = A^{-1}\bar{\pi}. \quad (20)$$

Після виконання відповідних дій, рівняння (20) дає такий результат:

$$\theta_{sdk} = \frac{1}{\Delta}(\pi_3(\alpha_{12}\alpha_{23} - \alpha_{13}\alpha_{22}) - \pi_1\alpha_{23}\alpha_{32});$$

$$\theta_w = \frac{1}{\Delta}(\pi_3\alpha_{13}\alpha_{21} + \pi_1\alpha_{23}\alpha_{31});$$

$$\theta_{sz}(s) = \frac{1}{\Delta}(\pi_1(\alpha_{21}\alpha_{32} - \alpha_{22}\alpha_{31}) - \pi_3\alpha_{12}\alpha_{21}),$$

де

$$\Delta = \alpha_{12}\alpha_{23}\alpha_{31} + \alpha_{13}\alpha_{21}\alpha_{32} - \alpha_{13}\alpha_{22}\alpha_{31}.$$

Отримані значення θ_{sdk} і $\theta_{sz}(s)$ підставимо у вирази (11) і (12). Якщо врахувати значення π_1 і π_3 , то отримаємо

$$\begin{aligned} & \left((\tau_n s + 1 + k_{\theta n}) - \frac{k_{nep}(\alpha_{21}\alpha_{32} - \alpha_{22}\alpha_{31})}{\Delta} \right) \theta_n^{out}(s) + \frac{2}{\Delta} \alpha_{12}\alpha_{21}K_{t,1}\theta_{dg}(s) = \\ & = \left((k_{\theta n} - 1 - \tau_n s) + \frac{k_{nep}(\alpha_{21}\alpha_{32} - \alpha_{22}\alpha_{31})}{\Delta} \right) \theta_n^{in}(s) + k_g g_n(s), \end{aligned} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2\Delta} k_{nep} K_{\theta 1} \alpha_{23} \alpha_{32} \theta_n^{out}(s) + \left((\tau_{\theta 1} s + 1) - \frac{K_{\theta 1} K_{t,1}}{\Delta} (\alpha_{12} \alpha_{23} - \alpha_{13} \alpha_{22}) \right) \theta_{dg}(s) = \\ & = -\frac{1}{2\Delta} k_{nep} K_{\theta 1} \alpha_{23} \alpha_{32} \theta_n^{in}(s) + K_u u(s). \end{aligned} \quad (22)$$

Систему рівнянь (21) і (22) об'єднаємо в одне векторно-матричне рівняння, тобто

$$A\bar{Y}(s) = \bar{b}, \quad (23)$$

де

$$A = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix}; \quad \bar{Y}(s) = \begin{bmatrix} \theta_n^{out} \\ \theta_n \end{bmatrix}; \quad \bar{b} = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix};$$

$$A_{11}(s) = \tau_n s + 1 + k_{\theta n} - \frac{k_{nep}(\alpha_{21}\alpha_{32} - \alpha_{22}\alpha_{31})}{\Delta}; \quad A_{12}(s) = \frac{2}{\Delta}\alpha_{12}\alpha_{21}K_{t,1};$$

$$A_{21}(s) = \frac{1}{2\Delta}k_{nep}K_{\theta 1}\alpha_{23}\alpha_{32}; \quad A_{22}(s) = (\tau_{\theta 1}s + 1) - \frac{K_{\theta 1}K_{t,1}}{\Delta}(\alpha_{12}\alpha_{23} - \alpha_{13}\alpha_{22}).$$

$$b_1 = \left((k_{\theta n} - 1 - \tau_n s) + \frac{k_{nep}(\alpha_{21}\alpha_{32} - \alpha_{22}\alpha_{31})}{\Delta} \right) \theta_n^{in}(s) + k_g g_n(s),$$

$$b_2 = -\frac{1}{2\Delta}k_{nep}K_{\theta 1}\alpha_{23}\alpha_{32}\theta_n^{in}(s) + K_u u(s).$$

Оскільки виходами об'єкта (нагрівника) є величини θ_n^{out} і $\theta_{dg}(s)$, то із рівняння (23) знаходимо

$$\bar{Y}(s) = A^{-1}\bar{b}. \quad (24)$$

Рівняння (24) подамо у розгорнутому вигляді:

$$\theta_n^{out} = \frac{1}{\Delta_{out}}(A_{22}b_1 - A_{12}b_2);$$

$$\theta_{dg} = \frac{1}{\Delta_{out}}(A_{11}b_2 - A_{21}b_1),$$

де $\Delta_{out} = A_{11}A_{22} - A_{12}A_{21}$.

Якщо врахувати значення b_1 і b_2 , то прийдемо до такого результату:

$$\theta_n^{out} = \frac{1}{\Delta \cdot \Delta_{out}} \left(\left((k_{\theta n} - 1 - \tau_n s)\Delta + k_{nep}A_{22}(\alpha_{21}\alpha_{32} - \alpha_{22}\alpha_{31}) \right) + \frac{A_{12}}{2}k_{nep}K_{\theta 1}\alpha_{23}\alpha_{32} \right) \theta_n^{in}(s) +$$

$$+ \frac{k_g A_{22}}{\Delta_{out}}g_n(s) - \frac{K_u A_{12}}{\Delta_{out}}u(s); \quad (25)$$

$$\theta_{dg} = -\frac{1}{\Delta} \cdot \frac{1}{\Delta_{out}} \left(\frac{A_{11}}{2}k_{nep}K_{\theta 1}\alpha_{23}\alpha_{32} + A_{21}((k_{\theta n} - 1 - \tau_n s)\Delta) + k_{nep}(\alpha_{21}\alpha_{32} - \alpha_{22}\alpha_{31}) \right) \theta_n^{in}(s) -$$

$$- \frac{k_g A_{21}}{\Delta_{out}}g_n(s) + \frac{A_{11}K_u}{\Delta_{out}}u(s). \quad (26)$$

Отримані рівняння (25) і (26) дають змогу визначити шість передавальних функцій, які характеризують динаміку непрямого нагрівника нафти. Отже,

$$w_{11}(s) = \frac{1}{\Delta \cdot \Delta_{out}} \left(A_{22}((k_{\theta n} - 1 - \tau_n s)\Delta + k_{nep}(\alpha_{21}\alpha_{32} - \alpha_{22}\alpha_{31})) + \frac{A_{12}}{2}k_{nep}K_{\theta 1}\alpha_{23}\alpha_{32} \right);$$

$$w_{12}(s) = \frac{k_g A_{22}}{\Delta_{out}}; \quad w_{13}(s) = -\frac{K_u A_{12}}{\Delta_{out}};$$

$$w_{21}(s) = -\frac{1}{\Delta} \cdot \frac{1}{\Delta_{out}} \left(\frac{A_{11}}{2}k_{nep}K_{\theta 1}\alpha_{23}\alpha_{32} + A_{21}((k_{\theta n} - 1 - \tau_n s)\Delta) + k_{nep}(\alpha_{21}\alpha_{32} - \alpha_{22}\alpha_{31}) \right);$$

$$w_{22}(s) = -\frac{k_g A_{21}}{\Delta_{out}}; \quad w_{23}(s) = \frac{A_{11}K_u}{\Delta_{out}}.$$

Рівняння (25) і (26) об'єднаємо в одне векторно-матричне рівняння

$$\bar{Y}(s) = W(s)\bar{F}(s), \quad (27)$$

де

$$W(s) = \begin{bmatrix} w_{11}(s) & w_{12}(s) & w_{13}(s) \\ w_{21}(s) & w_{22}(s) & w_{23}(s) \end{bmatrix}; \quad \bar{F}(s) = \begin{bmatrix} \theta_n^{in} \\ g_n \\ u \end{bmatrix}.$$

Матричну передавальну функцію $W(s)$ розіб'ємо на два блоки. Тоді

$$Y(s) = [W_1(s) \quad W_2(s)] \begin{bmatrix} u(s) \\ \bar{f}(s) \end{bmatrix},$$

де

$$W_1(s) = \begin{bmatrix} w_{13}(s) \\ w_{23}(s) \end{bmatrix}; \quad W_2(s) = \begin{bmatrix} w_{11}(s) & w_{12}(s) \\ w_{21}(s) & w_{22}(s) \end{bmatrix}; \quad \bar{f}(s) = \begin{bmatrix} \theta_n^{in} \\ g_n \end{bmatrix}.$$

Після зроблених позначень векторно-матричне рівняння (27) набуде такого вигляду:

$$Y(s) = W_1(s)u(s) + W_2(s)\bar{f}(s). \quad (28)$$

У рівнянні (28) $\bar{f}(s)$ – вектор зовнішніх збурень, які діють на об'єкт.

Використовуючи рівняння (28), створимо структурну схему нагрівника як об'єкта автоматичного керування (рис. 4).

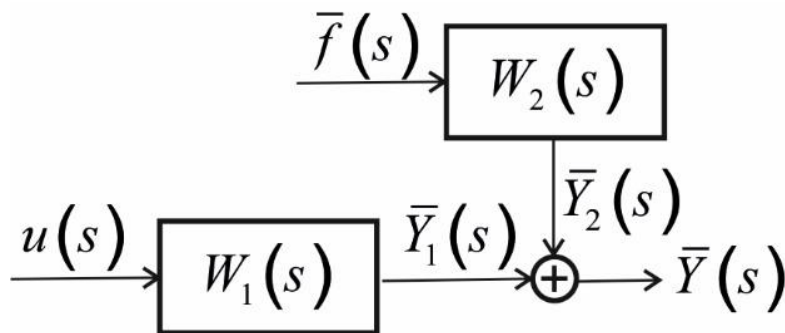


Рис. 4 – Структурна векторно-матрична схема нагрівника як об'єкта керування

На основі системи рівнянь (25) і (26) створена деталізована структурна схема нагрівника як об'єкта автоматичного керування (рис. 5).

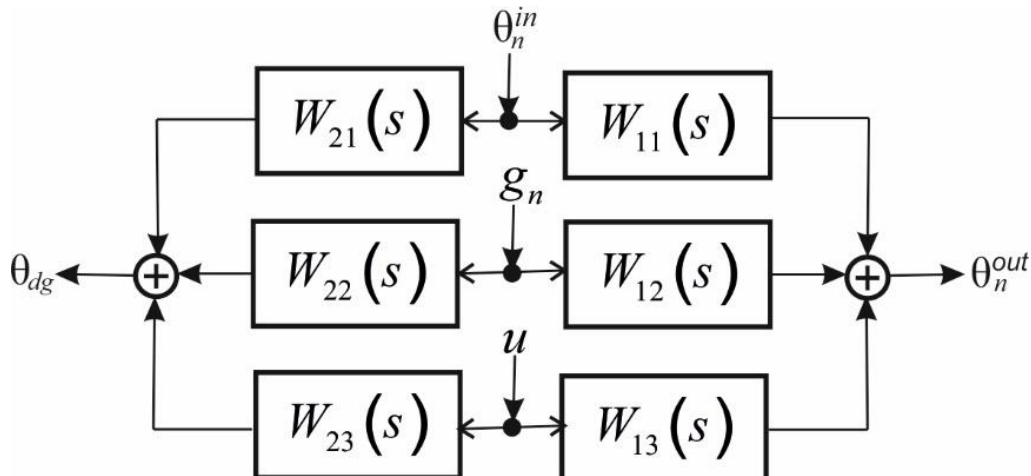


Рис. 5 – Структурна схема нагрівника нафти як об'єкта автоматичного керування

Отримана лінеаризована математична модель нагрівника та його структурна схема (рис. 5) є основою для створення ефективної системи автоматичного керування процесом нагрівання нафти перед її транспортуванням або подачею споживачам.

Висновки

1. На основі законів збереження енергії отримані диференціальні рівняння динаміки шляхового нагнітача, які придатні для синтезу автоматичного керування і, які на відміну від роботи [11], температура води водяної бані є проміжною координатою. Встановлено, що вихідними координатами нагрівника з проміжним теплоносієм є температура робочого продукту (нафти) на виході нагрівника та температура димових газів, які функціонально залежать від витрати паливного газу.

2. Вперше отримана лінеаризована математична модель шляхового нагрівника нафти з проміжним теплоносієм у вигляді шести передавальних функцій як по каналам керуючих впливів, так і по каналам збурень, що дало змогу синтезувати структурну схему нагрівника як об'єкта автоматичного керування, яка буде основою для синтезу ефективної системи автоматичного керування процесом нагріву нафти в нагрівнику.

Перелік використаних джерел:

1. Rahmati A. R., Reiszadeh M. An experimental study on the effects of the use of multi-walled carbon nanotubes in ethylene glycol/water-based fluid with indirect heaters in gas pressure reducing stations. *Applied Thermal Engineering*. 2018. Vol. 134. Pp. 107-117. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.01.111>.
2. An active approach to heat transfer enhancement in indirect heaters of city gate stations: An experimental modeling / A. Amiri Delouei et al. *Applied Thermal Engineering*. 2024. Vol. 237. Article 121795. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.121795>.
3. Rashidmardani A., Hamzei M. Effect of Various Parameters on Indirect Fired Water Bath Heaters' Efficiency to Reduce Energy Losses. *Science and Engineering Investigations*. 2013. Vol. 2. Iss. 12. Pp. 17-24.
4. Mostafavi S.A., Shirazi M. Thermal modeling of indirect water heater in city gate station of natural gas to evaluate efficiency and fuel consumption. *Energy*. 2020. № 212. Article 118390. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118390>.
5. 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 Equipment and Systems*. 2020. Vol. 8. No. 4. Pp. 349-365. DOI: <https://doi.org/10.22059/ees.2020.241292>.
6. Performance enhancement of water bath heater at natural gas city gate station using twisted tubes / Soleimani P., Khoshvaght-Aliabadi M., Rashidi H., Bahmanpour H. *Chinese Journal of Chemical Engineering*. 2020. Vol. 28(1). Pp. 165-179. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cjche.2019.03.018>.
7. Failure analysis of carbon steel components in a water bath heater and the influence of ethylene glycol concentration / Shabanian S., Ashrafizadeh F., Saeidi N., Ashrafi A. *Engineering Failure Analysis*. 2016. Vol. 66. Pp. 533-543. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2016.05.015>.
8. Improving thermal performance of water bath heaters in natural gas pressure drop stations / Khosravi M., Arabkoohsar A., Alsagri A.S., Sheikholeslami M. *Applied Thermal Engineering*. 2019. Vol. 159. Article 113829. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.113829>.
9. Design of a simple temperature transmitter circuit of an electric heater operated water bath / Chakraborty S., Bera S. K., Bera S. C., Mandal N. *IEEE Sensors Journal*. 2018. Vol. 18(8). Pp. 3140-3151. DOI: <https://doi.org/10.1109/JSEN.2018.2809465>.
10. Induction heating of petroleum products as an efficient technological process / A. I. Nikitin et al. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 950. Article 012030.
11. Горбійчук М. І., Когутяк М. І., Гарасимів В. М. Математична модель підігрівника з проміжним теплоносієм. *Методи та прилади контролю якості*. 2021. № 2(47). С. 83-95. DOI: [https://doi.org/10.31471/1993-9981-2021-2\(47\)-83-95](https://doi.org/10.31471/1993-9981-2021-2(47)-83-95).
12. Energetic, exergetic, environmental and economic assessment of a novel control system for indirect heaters in natural gas city gate stations / Ebrahimi-Moghadam A., Deymi-Dashtebayaz M., Jafari H., Niazmand A. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2020. Vol. 141. Pp. 2573-2588. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10973-020-09413-4>.
13. Горбійчук М. І., Василенчук М. З., Когутяк М. І. Синтез лінеаризованих математичних моделей нагрівника з проміжним теплоносієм. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*. 2023. Вип. 3. С. 144-153. DOI: <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2023-75-17>.
14. Горбійчук М. І., Василенчук М. З. Синтез структурної схеми нагрівника нафти як об'єкта автоматичного керування. *Вісник Херсонського національного технічного університету*. 2023. № 4(87). С. 44-52. DOI: <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2023.4.5>.

References:

1. A.R. Rahmati, and M. Reiszadeh, «An experimental study on the effects of the use of multi-walled carbon nanotubes in ethylene glycol/water-based fluid with indirect heaters in gas pressure reducing stations», *Applied Thermal Engineering*, vol. 134, pp. 107-117, 2018. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2018.01.111.
2. A. Amiri Delouei, H. Naeimi, H. Sajjadi, M. Atashafrooz, M. Imanparast, and A.J. Chamkha, «An active approach to heat transfer enhancement in indirect heaters of city gate stations: An experimental modeling», *Applied Thermal Engineering*, vol. 237, article 121795, 2024. doi:

- 10.1016/j.applthermaleng.2023.121795.**
3. A. Rashidmardani, and M. Hamzei, «Effect of Various Parameters on Indirect Fired Water Bath Heaters' Efficiency to Reduce Energy Losses», *Science and Engineering Investigations*, vol. 2, iss. 12, pp. 17-24, 2013.
 4. S.A. Mostafavi, and M. Shirazi, «Thermal modeling of indirect water heater in city gate station of natural gas to evaluate efficiency and fuel consumption», *Energy*, № 212, 2020, article 118390. **doi: 10.1016/j.energy.2020.118390.**
 5. S. Khanmohammadi, and A. Shahsavar, «Thermodynamic assessment and proposal of new configurations of an indirect water bath heater for a City Gate Station (a case study)», *Energy Equipment and Systems*, vol. 8, no. 4, pp. 349-365, 2020. **doi: 10.22059/ees.2020.241292.**
 6. P. Soleimani, M. Khoshvaght-Aliabadi, H. Rashidi, and H. Bahmanpour, «Performance enhancement of water bath heater at natural gas city gate station using twisted tubes», *Chinese Journal of Chemical Engineering*, vol. 28(1), pp. 165-179, 2020. **doi: 10.1016/j.cjche.2019.03.018.**
 7. S. Shabanian, F. Ashrafizadeh, N. Saeidi, and A. Ashrafi, «Failure analysis of carbon steel components in a water bath heater and the influence of ethylene glycol concentration», *Engineering Failure Analysis*, vol. 66, pp. 533-543, 2016. **doi: 10.1016/j.engfailanal.2016.05.015.**
 8. M. Khosravi, A. Arabkoohsar, A.S. Alsagri, and M. Sheikholeslami, «Improving thermal performance of water bath heaters in natural gas pressure drop stations», *Applied Thermal Engineering*, vol. 159, article 113829, 2019. **doi: 10.1016/j.applthermaleng.2019.113829.**
 9. S. Chakraborty, S.K. Bera, S.C. Bera, and N. Mandal, «Design of a simple temperature transmitter circuit of an electric heater operated water bath», *IEEE Sensors Journal*, vol. 18(8), pp. 3140-3151, 2018. **doi: 10.1109/JSEN.2018.2809465.**
 10. A.I. Nikitin, N.A. Pavlova, N.G. Bereslavskaya, S.I. Kolesnikov, and V.V. Yagov, «Induction heating of petroleum products as an efficient technological process», *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 950, article 012030, 2020.
 11. M.I. Horbiichuk, M.I. Kohutyak, and V.M. Harasymiv, «Matematychna model pidhrivnyka z promizhnym teplonosiiem» [«Mathematical model of the heater with intermediate heat»], *Metody ta prylady kontroliu yakosti – Methods and devices of quality control*, vol. 2(47), pp. 83-95, 2021. **doi: 10.31471/1993-9981-2021-2(47)-83-95.** (Ukr.)
 12. A. Ebrahimi-Moghadam, M. Deymi-Dashtebayaz, H. Jafari, and A. Niazmand, «Energetic, exergetic, environmental and economic assessment of a novel control system for indirect heaters in natural gas city gate stations», *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, vol. 141, pp. 2573-2588, 2020. **doi: 10.1007/s10973-020-09413-4.**
 13. M. Vasylenchuk, M. Horbiichuk, and M. Kohutyak, «Syntez linearyzovanykh matematychnykh modelei nahrivnyka z promizhnym teplonosiiem» [«Synthesis of linearized mathematical models of the heater with intermediate heat carrier»], *Vymiriuvalna ta obchysliuvalna tekhnika v tekhnolohichnykh protsesakh – Measuring and computing devices in technological processes*, vol. 3, pp. 144-153, 2023. **doi: 10.31891/2219-9365-2023-75-17.**
 14. M. Horbiichuk, and M. Vasylenchuk, «Syntez strukturnoi skhemy nahrivnyka nafty yak obiekta avtomatychnoho keruvannia» [«Synthesis of the structural diagram of the oil heater as an object of automatic control»], *Visnyk Khersonskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu – Visnyk of Kherson National Technical University*, no. 4(87), pp. 44-52, 2023. **doi: 10.35546/kntu2078-4481.2023.4.5.**

Стаття надійшла 01.10.2024

Стаття прийнята 15.10.2024