

Наука — виробництву

УДК 622.692.4

DOI: 10.69628/pdogf/4.2023.58

ОСОБЛИВОСТІ РОЗРАХУНКУ ПРОЦЕСУ ПІДІГРІВУ БІТУМУ ДО ТЕХНОЛОГІЧНО НЕОБХІДНОЇ ТЕМПЕРАТУРИ

С. Я. Григорський, Н. Я. Дрінь, О. В. Іванов*, А. В. Грицанчук, Т. Ю. Пиріг, О. М. Бортняк

ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15; тел. (0342) 727138,
e-mail: oleksandr.ivanov@nung.edu.ua

Розглянуто особливості термодинамічних розрахунків для досягнення технологічно необхідної температури бітуму під час його підігріву за допомогою змійовикового підігрівача. На основі даних результатів експериментальних досліджень розроблено уточнені математичні моделі для розрахунку основних теплофізичних властивостей (густини, кінематичної в'язкості, ізобарної теплоємності, коефіцієнта теплопровідності та об'ємного розширення) бітуму марки БНД 60/90 та гарячого теплоносія термічного масла АМТ-300, що використовується для розігріву бітуму. Запропоновано аналітичні залежності, що дають змогу адекватно оцінити значення коефіцієнтів тепловіддачі для різних видів теплообміну, залежно від типу ємності, де зберігається бітум. Наведено детальний алгоритм розрахунку необхідного часу розігріву бітуму із врахуванням критеріїв подібності швидкісних та теплових полів, фізичних властивостей теплоносія та бітуму, температури зберігання та навколишнього середовища. Запропоновану методика апробовано на прикладі розрахунку бітуму БНД 60/90, що зберігається у горизонтальній цистерні із тепловою ізоляцією. Отримано графічні залежності, що дають змогу оцінити технологічно необхідний час розігріву бітуму БНД 60/90 до заданої температури залежно від температури навколишнього середовища, об'ємної витрати та температури гарячого теплоносія на вході в теплообмінний апарат.

Ключові слова: термодинамічний розрахунок, процеси теплообміну, коефіцієнт теплопередачі, критерій подібності, фізичні властивості бітуму.

The features of thermodynamic calculations for achieving the technologically necessary temperature of bitumen in the process of its heating with the help of a coil heater are considered. Based on the results of experimental studies, refined mathematical models were developed for calculating the main thermophysical properties (density, kinematic viscosity, isobaric heat capacity, coefficient of thermal conductivity and volume expansion) of bitumen grade BND 60/90 and hot coolant of thermal oil AMT-300, which used for heating bitumen. Analytical dependences are proposed, which make it possible to adequately estimate the value of heat transfer coefficients for various types of heat exchange, depending on the type of container where bitumen is stored. A detailed algorithm for calculating the necessary bitumen heating time is presented, taking into account the criteria of similarity of speed and thermal fields, physical properties of the coolant and bitumen, storage temperature and ambient air. Approbation of the proposed methodology was carried out on the example of the calculation of BND 60/90 bitumen stored in a horizontal tank with thermal insulation. Graphical dependences have been obtained, which make it possible to estimate the technologically necessary time to heat up BND 60/90 bitumen to a given temperature, depending on the ambient temperature, volumetric flow rate, and the temperature of the hot coolant at the entrance to the heat exchanger.

Keywords: thermodynamic calculation, heat exchange processes, heat transfer coefficient, similarity criterion, physical properties of bitumen.

Вступ

Бітум відносяться до найбільш поширених органічних в'язучих речовин і є складною сумішшю з різноманітних за хімічною будовою рідких та твердих вуглеводнів та їх похідних, багатих киснем, що не розчиняються у воді, але розчиняються в сірковуглеці (CS₂), хлороформі і інших органічних розчинниках.

Залежно від вихідної сировини розрізняють природні і штучні нафтові бітуми.

Природний бітум є органічною речовиною темно-коричневого або чорного кольору, яка при нагріванні розм'якшується і переходить в рідкий стан, а при охолодженні твердне. У чистому вигляді природний бітум зустрічається досить рідко, частіше зустрічаються просочені бітумом гірські породи (вапняки, доломіти, пісковики). Бітумні доломітові і вапнякові породи без вилучення бітуму використовуються у вигляді тонкого порошку для отримання асфальтової мастики і асфальтового бетону. Природний бітум утворюється у результаті повільного видалення з нафти легких і середніх фракцій, а також під впливом процесів полімеризації і окислення. Природні бітуми відрізняються високою атмосферною стійкістю та високою адгезією до поверхні кам'яних матеріалів.

Нафтові (штучні) бітуми є органічно в'язучим продуктом, який отримується шляхом переробки нафтової сировини при виділенні з нього газів, бензину, гасу, дизельного палива тощо. Основною сировиною для отримання нафтових бітумів є гудрон – залишок після відгону з мазуту нафтових фракцій. Залежно від технології виробництва розрізняють такі нафтові бітуми:

- залишкові;
- окислені;
- крекінгові.

Залишкові бітуми отримують з гудрону шляхом подальшого глибокого вилучення з нього мастил. За нормальної температури залишкові бітуми є твердими або напівтвердими продуктами з відносно малою в'язкістю.

Окислені бітуми отримують шляхом окислення гудрону в спеціальних апаратах шляхом продування повітрям. У процесі виробництва окислених бітумів водень, що міститься в залишках, реагує з киснем повітря, утворюючи водяну пару. Відбувається втрата водню, яка супроводжується ущільненням нафтових залишків з їх полімеризацією та згущенням.

Крекінгові бітуми отримують шляхом переробки залишків, що утворюються під час крекінгу (розкладанні за високої температури)

нафти і нафтових мастил з метою отримання великого виходу бензину.

За консистенцією (за температури 18 °С) бітуми можуть бути:

- твердими, що володіють пружними, а іноді крихкими властивостями;
- напівтверді, що володіють в'язкопластичними властивостями;
- рідкими, які мають легко текучі властивості.

Нафтові бітуми – це дисперсні системи, в яких дисперсійним середовищем є мастила і смоли, а дисперсною фазою – асфальтени. Залежно від ступеня агрегування і пептизації нафтові бітуми утворюють різні міцелярні системи – золі, золи-гелі, гелі.

Компонентний склад бітуму зумовлює його колоїдну структуру і реологічну поведінку, і тим самим – технічні властивості, які характеризуються умовними показниками якості, які визначають в стандартних умовах.

Через велике різноманіття сполук, що входять до складу бітуму, неможливо виокремити якусь речовину з цієї складної суміші. Крім того, основна маса сполук, що входять до його складу, є речовинами гібридного характеру. Єдиний клас сполук, які можна виділити з бітумів в більш-менш чистому вигляді – це парафіни.

Особливість складу бітумів підтверджується і тим, що їх молекулярно-масовий розподіл охоплює межі від 300 до 40000 кг/кмоль і більше. Все це є причиною того, що аналіз складу бітумів важкий, неточний і має на меті виділити лише характерні групи, що відрізняються більшою чи меншою одноманітністю складу.

Отже, бітуми містять 80-85 % вуглецю, 8,0-11,5 % водню, 0,2-4,0 % кисню, 0,5-7,0 % сірки та 0,2-0,5 % азоту. За методом Маркуссо-на бітуми поділяють на мастила, смоли, асфальтени, асфальтогенові кислоти та їх ангідриди, або розділяють на *мальтени* (сума мастил та смол) та *асфальтени*.

Однак, слід додати, що дані сполуки знаходяться у генетичному зв'язку. Так, мастила у результаті процесів окислювальної конденсації, радикальної циклізації та окислювального дегідратування можуть перетворюватися в смоли, а далі – у асфальтени.

Мальтени – частина бітуму, розчинна у низькокиплячих насичених вуглеводнях (найчастіше у н-гептані). Містять в своєму складі високомолекулярні вуглеводні з температурою кипіння вище 350-450 °С – нафтові оливи та малолеткі гетероароматичні з'єднання – нафтові смоли.

Асфальтени – найбільш високомолекулярні компоненти нафти, тверді крихкі речовини чорного або бурого кольору, нерозчинні у насичених вуглеводнях. Розчиняються в гарячому бензолі та інших ароматичних вуглеводнях, а також в сірковуглеці і хлороформі, але не розчиняються в низькокиплячих метанових вуглеводнях. При розчиненні асфальтени утворюють не істинний (молекулярний), а колоїдний розчин або колоїдну систему.

Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень та публікацій

Значний ріст виробництва і споживання бітуму, а також підвищення вимог до їх якості потребують більш глибокого і усестороннього вивчення складу і властивостей бітумів, впливу параметрів технологічного режиму, кінетики і гідродинаміки процесів і природи сировини на ці показники. Тому ці питання продовжують цікавити широке коло теоретиків і практиків цієї справи.

На даний час в Україні на бітуми діють відповідні нормативні документи [1-10].

Бітум, як один із побічних продуктів процесів нафтової промисловості, є найпоширенішим в'язким, що використовується в дорожніх покриттях і в будівельній галузі загалом [11]. Це складна органічна суміш широкого діапазону вуглеводнів, класифікованих за чотирма хімічними групами, спільно відомими під аббревіатурою фракцій SARA, які включають насичені, ароматичні, смоли та асфальтени.

Для моделювання реологічних властивостей бітуму авторами [12] досліджено властивості текучості в області постійного зсуву та динамічної області. Концепція реограми використовується для створення незалежної від температури основної кривої, яка моделюється за допомогою простого рівняння Карро–Ясуді. Виявлено, що зміну в'язкості при нульовому зсуві із температурою можна моделювати за допомогою рівняння простого степеневого закону. Результати показали, що традиційний метод еквів'язкості з використанням віскозиметра Брукфілда не підходить для прогнозування температур змішування та ущільнення бітуму.

Авторами [13] показано, що бітум слід завжди зберігати та обробляти за найнижчої температури, що відповідає його ефективному використанню. За більш високих температур і меншої в'язкості перекачування оптимізується, тоді як при нижчих температурах і вищій в'язкості ефективність перекачування швидко знижується. Таким чином, в'язкість і її контроль за

температурою є важливим моментом щодо всіх операцій транспортування.

Висвітлення невирішених раніше частин загальної проблеми

Деякі аспекти процесу підігріву бітуму можуть залишатися невивченими або неоптимізованими. Наприклад, визначення оптимальних режимів підігріву для різних типів бітуму або урахування впливу вихідних параметрів бітуму на процес підігріву. Важливо визначити, чи існують нові методи аналізу та контролю процесу підігріву бітуму, які можуть покращити ефективність та точність цього процесу. Дослідження способів оптимізації процесу з метою зменшення впливу на навколишнє середовище та зниження енергетичних витрат може стати актуальним напрямом. Невирішеними залишаються можливості для підвищення ефективності та якості бітуму через оптимізацію процесу підігріву. Це може включати вдосконалення методів контролю температури, зменшення втрат тепла чи підвищення точності розрахунків.

Мета та завдання досліджень

Визначення оптимальних параметрів та режимів підігріву бітуму для досягнення технологічно необхідної температури.

Основні задачі досліджень:

– побудова математичних моделей основних фізичних властивостей бітуму, що використовуються під час відповідних теплових і гідравлічних розрахунків;

– аналіз технологічних вимог та особливостей процесу підігріву бітуму, включаючи режими роботи підігрівачів та температурні параметри;

– розроблення математичних моделей, які описують процес підігріву бітуму з урахуванням теплопередачі, теплоємності та інших факторів;

– виконання термодинамічних розрахунків з підігрівання бітуму за різних умов для визначення впливу параметрів процесу на досягнення технологічно необхідної температури.

Вказані задачі досліджень дають змогу встановити оптимальні параметри та режими підігріву бітуму для досягнення технологічно необхідної температури з метою підвищення якості виробництва та ефективності процесу.

Фізичні властивості для умов транспортування та зберігання бітуму

Температурний коефіцієнт густини характеризує зміну густини зі зміною температури

на один градус. Для всіх бітумів він майже однаковий і прийнятий рівним $0,6 \text{ кг}/(\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C})$.

Теплопровідність характерна для аморфних речовин і становить $0,5 \dots 0,6 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$.

Коефіцієнт об'ємного теплового розширення за $25 \text{ }^\circ\text{C}$ знаходиться в межах від $5 \cdot 10^{-4}$ до $8 \cdot 10^{-4} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, причому більш в'язкі бітуми мають більший коефіцієнт розширення. Коефіцієнт об'ємного розширення з підвищенням температури на $1 \text{ }^\circ\text{C}$ в інтервалі $60 \dots 300 \text{ }^\circ\text{C}$ для дорожніх бітумів знаходиться в межах $(3,3 \dots 4,2) \cdot 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$.

Стійкість при нагріванні характеризується втратою маси при нагріванні проби бітуму за температури $160 \text{ }^\circ\text{C}$ протягом 5 год (не більше 1 %) і температури спалаху $230 \dots 240 \text{ }^\circ\text{C}$ (залежно від марки бітуму).

Питома ізобарна теплоємність практично однакова для різних бітумів. Вона збільшується з підвищенням температури: зміна теплоємності бітумів різної консистенції на $1 \text{ }^\circ\text{C}$ дорівнює $(1,34 \dots 3,27) \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$. Теплоємність сумішей бітумів з мінеральними матеріалами (наповнювачами) можна розрахувати за правилом адитивності. В середньому питома теплоємність бітумів складає за температур, $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$: $0 \text{ }^\circ\text{C} - 1,67$; $100 \text{ }^\circ\text{C} - 1,88$; $200 \text{ }^\circ\text{C} - 2,09$; $300 \text{ }^\circ\text{C} - 2,30$.

Коефіцієнт теплопровідності для всіх бітумів практично однаковий і незначно зменшується з підвищенням температури. Так, за температури $0 \text{ }^\circ\text{C}$ він дорівнює $1,51 \dots 1,69 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$; за $20 \text{ }^\circ\text{C} - 1,45 \dots 1,57 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$; за $40 \text{ }^\circ\text{C} - 1,4 \dots 1,5 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$.

Водостійкість характеризується вмістом водорозчинних з'єднань (в бітумі не більше $0,2 \dots 0,3 \text{ } \%$ по масі).

Коефіцієнт температуропровідності, що характеризує швидкість процесу вирівнювання температур, прямопропорційний теплопровідності і оберненопропорційний питомій ізобарній теплоємності і густині матеріалу. В середньому він становить $(1,0 \dots 1,5) \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$ і мало відрізняється для бітумів з різної сировини.

Густина бітумів залежно від групового складу коливається в межах $800 \dots 1300 \text{ кг}/\text{м}^3$. Вона є однією з найважливіших характеристик бітуму, оскільки дозволяє зробити висновок про його походження.

Густина бітуму необхідна, зокрема, для обчислення об'ємних характеристик асфальтобетонних сумішей відповідно до EN 12697-8 «Асфальтобетонні суміші. Методи випробувань гарячих асфальтобетонних сумішей. Частина 8: Визначення змісту пустот».

В'язкість бітуму є одним з найбільш важливих технологічних і споживчих властивостей.

Динамічна в'язкість – це відношення напруги зсуву до швидкості зсуву. Динамічна в'язкість є мірою опору потоку рідини і зазвичай називається в'язкістю рідини [4].

Кінематична в'язкість – це відношення динамічної в'язкості до густини рідини. Кінематична в'язкість є мірою опору потоку рідини течії під впливом гравітації [3].

Температура розм'якшення визначає властивості бітуму за так званою «високою температурою» експлуатації та складає приблизно умовну верхню межу в'язкопружного стану бітуму.

Розрахунок необхідної кількості теплоти для розігріву бітуму від температури зберігання до заданого значення

Кількість тепла Q_i , МДж, який необхідний для підігріву заданої маси нафтопродукту від абсолютної початкової T_n до абсолютної кінцевої температури T_n становить:

– для підігріву всієї маси нафтопродукту G (т)

$$Q_1 = G \cdot c_p \cdot (T_k - T_n); \quad (1)$$

– для розплавлення застиглої частини нафтопродукту

$$Q_2 = G_m \cdot \lambda; \quad (2)$$

– кількість тепла, яка безповоротно втрачається в навколишнє середовище

$$Q_3 = K \cdot F \cdot \Delta T \cdot \tau, \quad (3)$$

де G_m – маса нафтопродукту в застиглому стані, т;

c_p – питома масова ізобарна теплоємність нафтопродукту за середньої температури нагріву, $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{K})$;

λ – прихована теплота плавлення нафтопродукту, $\text{кДж}/\text{кг}$;

K – повний усереднений коефіцієнт теплопередачі від нафтопродукту в навколишнє середовище, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{K})$;

F – повна площа поверхні охолодження, м^2 ;

ΔT – середня різниця абсолютних температур (середній температурний напір) між нафтопродуктом та навколишнім середовищем, K ;

τ – час розігріву нафтопродукту, с.

Середній тепловий потік Q_m , МВт, який передає підігрівач середовищу, що нагрівається, за одиницю часу,

$$Q_m = \frac{Q_1 + Q_2 + Q_3}{\tau}. \quad (4)$$

Кількість розігрітого нафтопродукту G та його питома теплоємність c_p , як правило, відомі. За початкову температуру зазвичай беруть ймовірну температуру нафтопродукту в кінці періоду зберігання. Кінцева температура розраховується, виходячи із конкретних технологічних умов.

У разі визначення втрат у навколишнє середовище повний коефіцієнт теплопередачі обчислюють для різних ємностей за формулами, що наведені нижче.

Коефіцієнт теплопередачі через стінку ємності:

$$\frac{1}{K_{cm}} = \frac{1}{\alpha_{1cm}} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_{2cm} + \alpha_{3cm}}, \quad (5)$$

де $\alpha_{1cm}, \alpha_{2cm}, \alpha_{3cm}$ – коефіцієнти тепловіддачі, відповідно внутрішній (від нафтопродукту до стінки ємності), зовнішні (від зовнішньої поверхні стінки в навколишнє середовище) та від стінки ємності радіацією, Вт/(м²·К);

δ_i – товщина стінки ємності, ізоляції і т.д., м;

λ_i – коефіцієнт теплопровідності матеріалу стінки, ізоляції і т.д., Вт/(м·К).

Внутрішній коефіцієнт тепловіддачі конвекцією від нафтопродукту до стінки ємності визначають за формулами:

– для горизонтальних циліндричних ємностей (характерний розмір діаметр d) та труб за значень добутку чисел Грасгофа Gr_d та Прандтля Pr : $(Gr_d \cdot Pr)_n = 10^3 \dots 10^8$ (тут i в подальшому нижній індекс « cp » використовується для середньої температури, « cm » – для температури стінки)

$$\alpha_{1cm} = 0,5 \cdot \frac{\lambda_n}{h} \cdot (Gr_d \cdot Pr)_{cp}^{0,25} \cdot \left(\frac{Pr_{cp}}{Pr_{cm}} \right)^{0,25}; \quad (6)$$

– для вертикальних циліндричних ємностей (характерний лінійний розмір висота h) і труб за ламінарного режиму $(Gr_h \cdot Pr)_{cp} = 10^3 \dots 10^9$

$$\alpha_{1cm} = 0,76 \cdot \frac{\lambda_n}{h} \cdot (Gr_h \cdot Pr)_{cp}^{0,25} \cdot \left(\frac{Pr_{cp}}{Pr_{cm}} \right)^{0,25}; \quad (7)$$

– для вертикальних циліндричних ємностей (характерний лінійний розмір висота h) і труб за турбулентного режиму $(Gr_h \cdot Pr)_{cp} > 10^9$

$$\alpha_{1cm} = 0,76 \cdot \frac{\lambda_n}{h} \cdot (Gr_h \cdot Pr)_{cp}^{0,33} \cdot \left(\frac{Pr_{cp}}{Pr_{cm}} \right)^{0,25}, \quad (8)$$

де λ_n – коефіцієнт теплопровідності нафтопродукту за середньої температури, Вт/(м·К).

Якщо відношення $\frac{T_n - T_0}{T_k - T_0} \leq 2$ (T_0 – температура навколишнього середовища, К), середню температуру визначають як середню арифметичну величину від початкової T_n та кінцевої T_k температур нафтопродукту

$$T_{cp} = 0,5 \cdot (T_n + T_k). \quad (9)$$

Якщо відношення $\frac{T_n - T_0}{T_k - T_0} > 2$, середню температуру визначають як середню логарифмічну величину

$$T_{cp} = T_0 + \frac{T_n - T_k}{\ln \frac{T_n - T_0}{T_k - T_0}}. \quad (10)$$

Оскільки в формулах (9), (10) T_k – невідома величина, то при визначенні середньої температури нафтопродукту можна прийняти, що

$$T_{cp} = 0,5 \cdot (T_{zak} + T_{nov}), \quad (11)$$

де T_{zak} – температура нафтопродукту, з якої він заливається (закачується) в ємність, К;

T_{nov} – температура навколишнього повітря, К.

Середню температуру стінки ємності визначають методом послідовних наближень за формулою

$$T_{cm} = T_{cp} - \frac{K_{cm}}{\alpha_{1cm}} \cdot (T_{cp} - T_0). \quad (12)$$

Коефіцієнт тепловіддачі α_{2cm} при вимушеній конвекції (обдуванні ємності або надземного трубопроводу вітром) визначають за спеціальними емпіричними формулами [14].

Зовнішній коефіцієнт тепловіддачі радіацією від стінки ємності або трубопроводу α_{3cm} визначають за формулою

$$\alpha_{3cm} = \varepsilon_{cm} \cdot C_s \cdot \frac{\left(\frac{T_{cm}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{nov}}{100} \right)^4}{T_{cm} - T_{nov}}, \quad (13)$$

де $C_s = 5,768$ Вт/(м²·К⁴) – стала Стефана-Больцмана;

ε_{cm} – ступінь чорноти поверхні стінки.

Розрахунок кількості теплоти від теплоносія (фактична кількість теплоти)

При розрахунку теплообмінних апаратів головним рівнянням є:

$$Q_t = K_t \cdot F_t \cdot \Delta T_{cp}, \quad (14)$$

де Q_t – кількість тепла, переданого теплоносієм через теплообмінний апарат в середовище, яке нагрівається за одиницю часу (тепловий потік);

K_t – коефіцієнт теплопередачі теплообмінного апарату (від теплоносія до середовища, що нагрівається), Вт/(м²·К);

F_t – повна поверхня нагріву теплообмінного апарату, м²;

ΔT_{cp} – середня логарифмічна різниця температур гарячого і холодного теплоносіїв, К.

Середньологарифмічний температурний напір визначають за формулою

$$\Delta T_{cp} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}}, \quad (15)$$

де $\Delta T_1, \Delta T_2$ – відповідно найбільший та найменший температурні напори між гарячим та холодним теплоносієм, К

$$\Delta T_1 = T'_m - T_n, \quad \Delta T_2 = T''_m - T_k, \quad (16)$$

T'_m, T''_m – температура теплоносія відповідно на вході і виході із теплообмінника, К.

Коефіцієнт теплопередачі для трубопроводів залежить від внутрішнього α_1 і зовнішнього α_2 коефіцієнтів тепловіддачі, а також від термічного опору стінки труби, ізоляції тощо

$$\frac{1}{K \cdot d} = \frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^n \frac{1}{2 \cdot \lambda_i} \cdot \ln \frac{D_i}{d_i} + \frac{1}{\alpha_2 \cdot D_3}, \quad (17)$$

де n – число шарів, врахованих при розрахунку;

λ_i – коефіцієнти теплопровідності відкладів, сталі, труби, ізоляції тощо, Вт/(м·К);

d_i, D_i – відповідно внутрішній і зовнішній діаметри i -го шару, м;

D_3 – зовнішній діаметр трубопроводу, м.

Для визначення α_1 при вимушеному руху рідини існують різні експериментальні залежності. Найбільш відомими є емпіричні формули Міхеєва:

- для ламінарного режиму для умови критерію Рейнольдса $Re_{cp} \leq 2000$

$$\alpha_1 = 0,17 \cdot \frac{\lambda_m}{d} \cdot Re_{cp}^{0,33} \cdot Pr_{cp}^{0,43} \cdot Gr_{cp}^{0,10} \cdot \left(\frac{Pr_{cp}}{Pr_{cm}} \right)^{0,25}, \quad (18)$$

- для турбулентного режиму при $Re_{cp} > 10^4$

$$\alpha_1 = 0,021 \cdot \frac{\lambda_m}{d} \cdot Re_{cp}^{0,8} \cdot Pr_{cp}^{0,43} \cdot \left(\frac{Pr_{cp}}{Pr_{cm}} \right)^{0,25}, \quad (19)$$

де λ_m – коефіцієнт теплопровідності гарячого теплоносія, Вт/(м·К);

Gr, Pr – відповідно критерії Грасгофа і Прандтля

$$Gr = \frac{l_x^3 \cdot g \cdot \beta_T \cdot (T_{cp} - T_{cm})}{\nu^2}, \quad Pr = \frac{\nu}{a}, \quad (20)$$

де l_x – характерний лінійний розмір, м;

β_T – коефіцієнт об'ємного розширення гарячого теплоносія, К⁻¹; a – коефіцієнт температуропровідності гарячого теплоносія, м²/с.

$$a = \frac{\lambda_m}{c_{pm} \cdot \rho_m}, \quad (21)$$

c_{pm} – питома масова ізобарна теплоємність гарячого теплоносія, Дж/(кгК);

ρ_m – густина гарячого теплоносія, кг/м³.

За відсутності експериментальних даних теплофізичні характеристики c_{pm}, λ_m можна розраховувати за класичними формулами Крєго та Сміта із поправкою на вид продукту [15-16].

У разі використання теплоносія як водяної пари коефіцієнт тепловіддачі від пари до внутрішньої стінки труби становить 3,5...11,6 кВт/(м²·К). При виборі інших теплоносіїв цю величину розраховують за критеріальним рівнянням. Коефіцієнт тепловіддачі α_{2n} від зовнішньої поверхні трубок теплообмінника в середовище, яке нагрівається при вільній конвекції, визначається за формулами (6)-(8).

Час розігріву τ необхідно підібрати так, щоб величина кількості теплоти, розрахована за формулами (4) і (14), дорівнювала одна одній із заданою наперед точністю.

Вихідні дані для проведення розрахунків

Технічні характеристики цистерни:

- корисний об'єм $V = 22,5$ м³;
- габаритні розміри – 6058×2438×2591 мм;
- внутрішній діаметр цистерни – 2304 мм;
- товщина стінки цистерни – 6 мм;
- матеріал, з якого виготовлена цистерна – сталь 09Г2С;
- коефіцієнт заповнення ємності – не більше 95 %.

Характеристика теплової ізоляції цистерни:

- базальтове волокно Pro Wiret Mat 80 товщиною 50 мм;
- лист алюмінієвий фарбований (чорний) 3003Н24.

Технічна характеристика підігрівача (конструктив на кресленнях):

– повна площа поверхні підігрівача – 18 м^2 ;

– труба $\frac{32 \times 3 \text{ ГОСТ } 8732 - 78}{Б 20 \text{ ГОСТ } 8731 - 74}$;

– теплоносій – АМТ-300 ТУ 38.101537-75 (термічне масло);

– робочий тиск - 5 бар ;

– температура на вході в підігрівач – $180 \text{ }^\circ\text{C}$;

– номінальна годинна витрата теплоносія – $2,5 \text{ м}^3/\text{год}$.

Початкова температура бітуму в цистерні – $60 \text{ }^\circ\text{C}$.

Необхідна температура розігріву бітуму – $80 \text{ }^\circ\text{C}$.

Марка бітуму – БНД 60/90.

Результати розрахунків необхідного часу розігріву бітуму

На основі експериментальних даних із використанням методів регресійного та кореляційного аналізів отримано залежності для розрахунку фізичних властивостей продуктів від абсолютної температури T :

1) для бітуму марки БНД 60/90 (у рідкому стані):

– густина

$$\rho = 1170 - 0,4653 \cdot T, \text{ кг/м}^3; \quad (22)$$

– кінематична в'язкість

$$\nu = \frac{1074}{\rho} \cdot \exp[-61,2 \cdot 10^{-3} \cdot (T - 273,15)], \text{ м}^2/\text{с}; \quad (23)$$

– ізобарна теплоємність

$$c_p = \frac{32,16}{\sqrt{\rho}} \cdot (1096 + 2,1 \cdot T), \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{K}); \quad (24)$$

– коефіцієнт теплопровідності

$$\lambda = \frac{2709}{\rho} \cdot (1 - 1,43 \cdot 10^{-3} \cdot T), \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{K}); \quad (25)$$

– коефіцієнт об'ємного розширення

$$\beta_T = \frac{2,83 \cdot (1388 - \rho)}{2515 - T}, \text{ K}^{-1}; \quad (26)$$

2) для гарячого теплоносія підігрівача (термічного масла АМТ-300)

– густина

$$\rho = 1156 - 0,6525 \cdot T, \text{ кг/м}^3; \quad (27)$$

– кінематична в'язкість

$$\nu = 0,1079 \cdot (T - 273,15)^{-2,156}, \text{ м}^2/\text{с}; \quad (28)$$

– ізобарна теплоємність

$$c_p = 625,5 + 3,348 \cdot T, \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{K}); \quad (29)$$

– коефіцієнт теплопровідності

$$\lambda = 0,1513 - 1,011 \cdot 10^{-4} \cdot T, \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{K}); \quad (30)$$

– коефіцієнт об'ємного розширення

$$\beta_T = \frac{1}{1772 - T}, \text{ K}^{-1}; \quad (31)$$

– ентальпія (для оцінки різниці температур на вході і виході теплообмінника)

$$h = 1,635 \cdot 10^{-3} \cdot T^2 + 0,6469 \cdot T - 298,9, \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}. \quad (32)$$

Ступінь ймовірності апроксимації (коефіцієнт детермінації) розроблених математичних моделей (22)-(32) близький до одиниці (перевіщує 0,992).

Використовуючи алгоритм розрахунку необхідної і фактичної кількості теплоти для розігріву заданої маси бітуму марки БНД 60/90 (коефіцієнт заповнення цистерни 0,90) та розроблене оригінальне програмне забезпечення, проводимо розрахунок часу розігріву бітуму від температури навколишнього середовища до $80 \text{ }^\circ\text{C}$. При цьому діапазон зміни температури навколишнього повітря t_0 становить від мінус 40 до плюс $40 \text{ }^\circ\text{C}$, об'ємної витрати масла $Q_{\text{вх}}$ на вході в теплообмінник – від $2,0$ до $3,0 \text{ м}^3/\text{год}$. Температура теплоносія на вході в теплообмінник постійна та становить $180 \text{ }^\circ\text{C}$. Результати виконаних розрахунків необхідного часу бітуму наведено на рисунку 1.

Для даних умов час розігріву бітуму марки БНД 60/90 змінюється від 14 до 4 год відповідно при зміні температури повітря від мінус $40 \text{ }^\circ\text{C}$ до плюс $40 \text{ }^\circ\text{C}$ та об'ємній годинній продуктивності гарячого теплоносія від 2 до $3 \text{ м}^3/\text{год}$. За фіксованого значення витрати гарячого теплоносія час розігріву лінійно зменшується зі збільшенням температури повітря.

На рисунку 2 наведено результати розрахунку часу розігріву бітуму від зміни температури гарячого теплоносія на вході в теплообмінник за середньої витрати $2,5 \text{ м}^3/\text{год}$.

З отриманої графічної залежності робимо висновок, що за фіксованої витрати гарячого теплоносія необхідний час розігріву бітуму до необхідної температури нелінійно зменшується при зростанні температури на вході в теплообмінний апарат. За допомогою рисунка 2 можна встановити мінімально необхідну температуру гарячого теплоносія для розігріву бітуму за наперед встановлений час за конкретної температури навколишнього середовища.

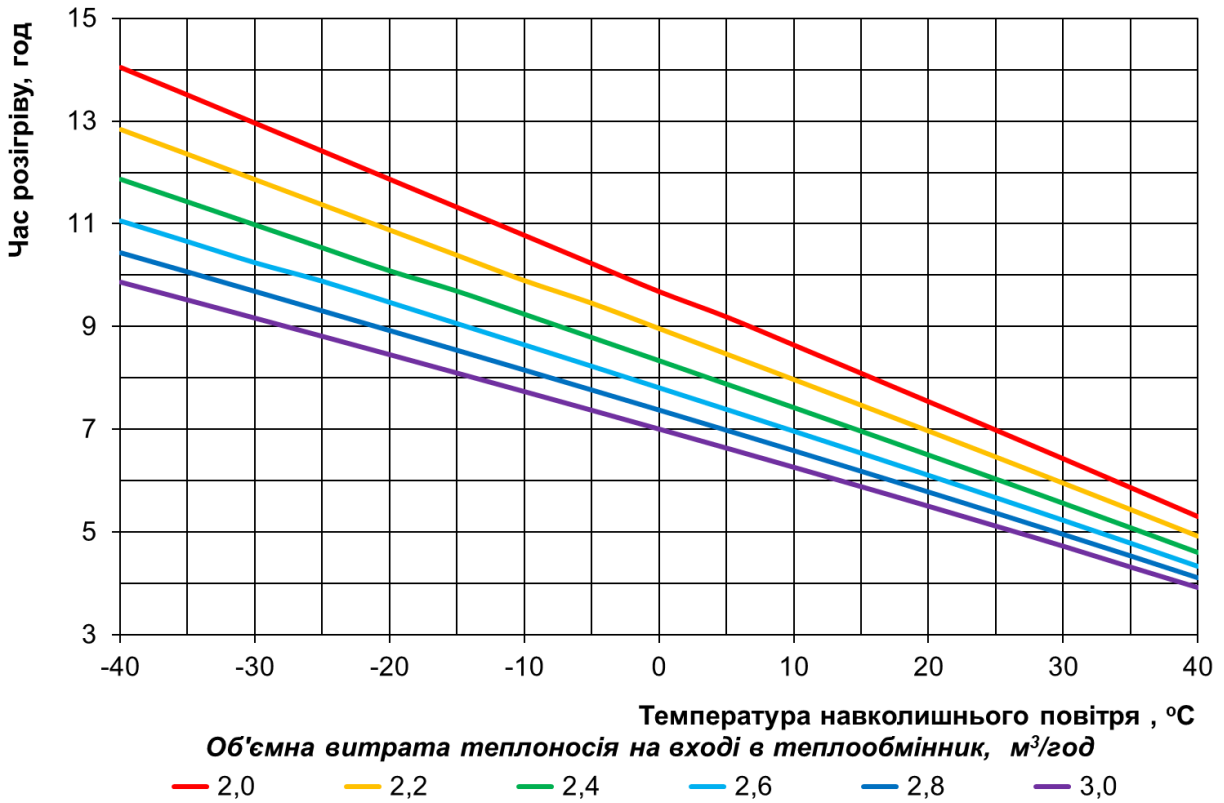


Рисунок 1 – Динаміка зміни часу розігріву бітуму від температури навколишнього середовища та об’ємної витрати теплоносія на вході в теплообмінник (температура мастила на вході в теплообмінник 180 °C)

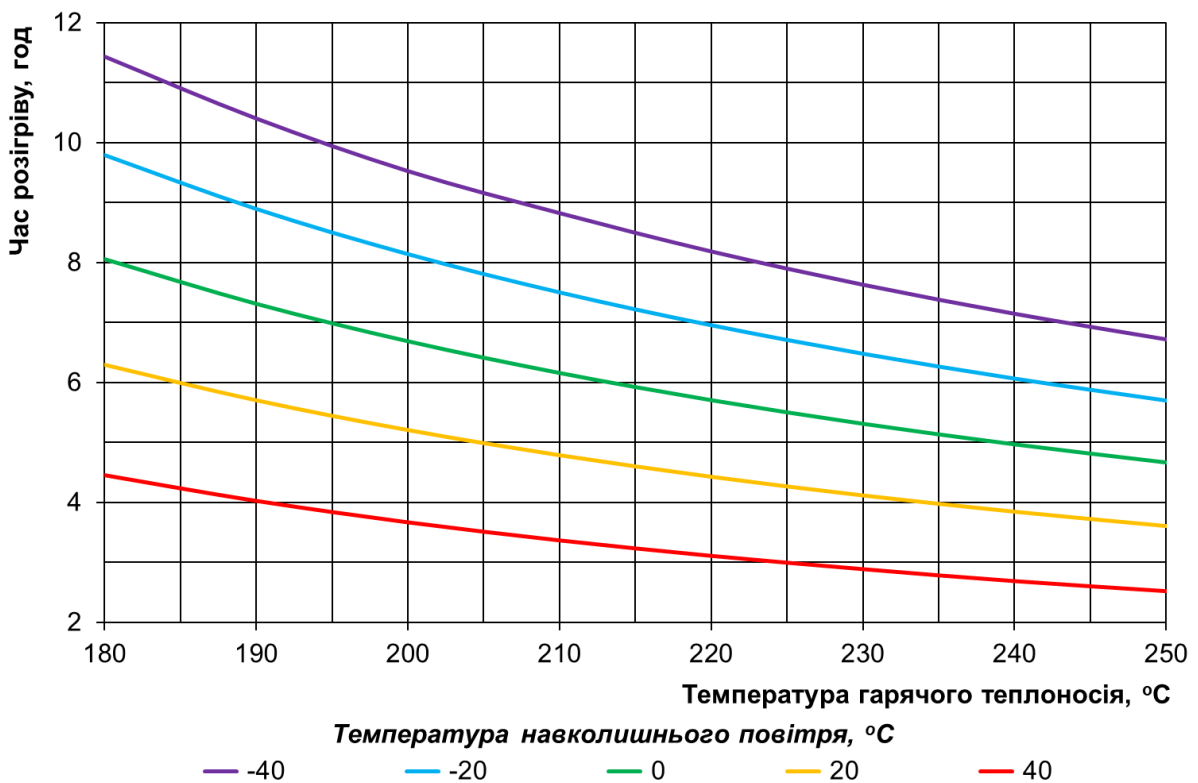


Рисунок 2 – Динаміка зміни часу розігріву бітуму від температури гарячого теплоносія на вході в теплообмінник

Висновки

1. Розроблено математичні моделі основних фізичних властивостей бітуму марки БНД 60/90 (у рідкому стані) та гарячого теплоносія термічного масла АМТ-300 залежно від фактичної температури продуктів. Вказані аналітичні залежності мають високий ступінь достовірності апроксимації ($R^2 > 0,993$) та можуть бути використані у відповідних теплових розрахунках процесу розігріву бітуму.

2. Запропоновано алгоритм розрахунку мінімального часу розігріву бітуму до технологічно необхідної температури із урахуванням температурного та гідравлічного режиму роботи підігрівача. В результаті проведених розрахунків у випадку зберігання бітуму БНД 60/90 у горизонтальній цистерні із тепловою ізоляцією, встановлено, що час розігріву лінійно зменшується за фіксованої витрати гарячого теплоносія при зростанні температури зберігання (за довготривалого зберігання це буде температура навколишнього середовища).

3. За постійного гідравлічного режиму роботи теплообмінника (витрата гарячого теплоносія незмінна) та заданої температури зберігання, необхідна температура розігріву бітуму збільшується нелінійно при зменшенні температури теплоносія на вході в теплообмінник. Встановлено, що при зміні температури теплоносія АМТ-300 від 180 °С до 250 °С необхідний час розігріву бітуму БНД 60/90 зменшується в середньому в 1,7 разів для діапазону температур навколишнього повітря від мінус 20 °С до плюс 30 °С.

4. Розв'язок задачі про знаходження мінімального часу для досягнення оптимальних умов підігріву бітуму до заданої температури вимагає інтегрованого підходу, що поєднує експериментальні дослідження за динамікою зміни властивостей бітуму і теплоносія при зміні їх температури, побудові відповідних математичних моделей, використанні емпіричних залежностей для термодинамічного розрахунку, що враховують особливості конструкції ємності для зберігання, теплової ізоляції, типу теплообмінного апарату та фактичних умов навколишнього середовища.

Література

1. ДСТУ EN 12591:2017 Бітум та бітумні в'язучі. Технічні вимоги до дорожніх бітумів (EN 12591:2009, IDT).

2. ДСТУ EN 12597:2018 Бітум та бітумні в'язучі. Словник термінів (EN 12597:2014, IDT).

3. ДСТУ EN 12595:2018 Бітум та бітумні в'язучі. Визначення кінематичної в'язкості (EN 12595:2014, IDT).

4. ДСТУ EN 12596:2018 Бітум та бітумні в'язучі. Визначення динамічної в'язкості з використанням вакуумного капілярного віскозиметра (EN 12596:2014, IDT).

5. ДСТУ EN 15326:2019 Бітум та бітумні в'язучі. Визначення густини та відносної густини. Метод з використанням пікнометра з капіляром у пробці (EN 15326:2007 + A1:2009, IDT).

6. ДСТУ EN 14023:2019 Бітум і бітумні в'язучі. Технічні вимоги до бітумів, модифікованих полімерами (EN 14023:2010, IDT).

7. ДСТУ EN 13924:2019 Бітум і бітумні в'язучі. Технічні вимоги до твердих бітумів для дорожніх покриттів (EN 13924:2006, IDT).

8. ДСТУ 8860:2019 Бітум та бітумні в'язучі. Метод визначення еквів'язких температур.

9. ДСТУ 9116:2021 Бітум та бітумні в'язучі. Бітуми дорожні, модифіковані полімерами. Технічні умови.

10. ДСТУ 9133:2021 Бітум та бітумні в'язучі. Бітуми дорожні, модифіковані комплексами добавок. Технічні умови.

11. Porto M, Angelico R, Caputo P, Abe AA, Teltayev B, Rossi CO. The Structure of Bitumen: Conceptual Models and Experimental Evidences. *Materials*. 2022; 15(3):905. <https://doi.org/10.3390/ma15030905>.

12. Nikhil Saboo, Praveen Kumar, Use of flow properties for rheological modeling of bitumen. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 2016, Vol. 9, Iss. 1, P. 63-72, ISSN 1996-6814, <https://doi.org/10.1016/j.ijprt.2016.01.005>.

13. Justas Bražiūnas, Henrikas Sivilevičius. Heat Transfer and Energy Loss in Bitumen Batching System of Asphalt Mixing Plant. *The 9th International Conference "ENVIRONMENTAL ENGINEERING"* 22–23 May 2014, Vilnius, Lithuania. <https://doi.org/10.3846/enviro.2014.146>.

14. Kuppan T. Heat Exchanger Design Handbook (Mechanical Engineering) 2nd Edition. 2013. 1272 p. ISBN 978-1-4398-4212-6.

15. Середюк М. Д., Якимів Й. В., Лісафін В. П. Трубопровідний транспорт нафти і нафтопродуктів : [підруч. для студ. вищ. навч. закл.]. Івано-Франківськ: Кременчук, 2001. 517 с.

16. Лісафін В. П., Лісафін Д. В. Проектування та експлуатація складів нафти і нафтопродуктів: [підруч. для студ. вищ. навч. закл.]. Івано-Франківськ: Факел, 2006. 597 с.

References

1. DSTU EN 12591:2017 Bitum ta bitumni v'iazhuchi. Tekhnichni vymohy do dorozhnikh bitumiv (EN 12591:2009, IDT). [in Ukrainian]
2. DSTU EN 12597:2018 Bitum ta bitumni v'iazhuchi. Slovnyk terminiv (EN 12597:2014, IDT). [in Ukrainian]
3. DSTU EN 12595:2018 Bitum ta bitumni viazhuchi. Vyznachennia kinematychnoi viazkosti (EN 12595:2014, IDT). [in Ukrainian]
4. DSTU EN 12596:2018 Bitum ta bitumni viazhuchi. Vyznachennia dynamichnoi viazkosti z vykorystanniam vakuumnoho kapiliarnoho viskozymetra (EN 12596:2014, IDT). [in Ukrainian]
5. DSTU EN 15326:2019 Bitum ta bitumni viazhuchi. Vyznachennia hustyny ta vidnosnoi hustyny. Metod z vykorystanniam piknometra z kapiliarom u probtsi (EN 15326:2007 + A1:2009, IDT). [in Ukrainian]
6. DSTU EN 14023:2019 Bitum i bitumni viazhuchi. Tekhnichni vymohy do bitumiv, modyfikovanykh polimeramy (EN 14023:2010, IDT). [in Ukrainian]
7. DSTU EN 13924:2019 Bitum i bitumni viazhuchi. Tekhnichni vymohy do tverdykh bitumiv dlia dorozhnikh pokryttiv (EIN 13924:2006, IDT). [in Ukrainian]
8. DSTU 8860:2019 Bitum ta bitumni v'iazhuchi. Metod vyznachennia ekviv'iazkykh temperatur. [in Ukrainian]
9. DSTU 9116:2021 Bitum ta bitumni viazhuchi. Bitumy dorozhni, modyfikovani polimeramy. Tekhnichni umovy. [in Ukrainian]
10. DSTU 9133:2021 Bitum ta bitumni viazhuchi. Bitumy dorozhni, modyfikovani kompleksamy dobavok. Tekhnichni umovy.
11. Porto M, Angelico R, Caputo P, Abe AA, Teltayev B, Rossi CO. The Structure of Bitumen: Conceptual Models and Experimental Evidences. *Materials*. 2022; 15(3):905. <https://doi.org/10.3390/ma15030905>.
12. Nikhil Saboo, Praveen Kumar, Use of flow properties for rheological modeling of bitumen. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 2016, Vol. 9, Iss. 1, P. 63-72, ISSN 1996-6814, <https://doi.org/10.1016/j.ijprt.2016.01.005>.
13. Justas Bražiunas, Henrikas Sivilevicius. Heat Transfer and Energy Loss in Bitumen Batching System of Asphalt Mixing Plant. *The 9th International Conference "ENVIRONMENTAL ENGINEERING"* 22–23 May 2014, Vilnius, Lithuania. <https://doi.org/10.3846/enviro.2014.146>.
14. T. Kupan. Heat Exchanger Design Handbook (Mechanical Engineering) 2nd Edition. 2013. 1272 p. ISBN 978-1-4398-4212-6.
15. Serediuk M.D., Yakymiv Y.V., Lisafin V.P. Truboprovodnyi transport nafty i naftoproduktiv : [pidruch. dlia stud. vyshch. navch. zakl.]. Ivano-Frankivsk: Kremenchuk, 2001. 517 p. [in Ukrainian]
16. Lisafin V.P. , Lisafin D.V. Proektuvannia ta ekspluatatsiia skladiv nafty i naftoproduktiv: [pidruch. dlia stud. vyshch. navch. zakl.]. Ivano-Frankivsk: Fakel, 2006. 597 p. [in Ukrainian]