

УДК 697.3-52

**С. С. ТИТАР**, канд. техн. наук, проф., проф. ОНПУ, Одеса;  
**Д. В. ЗАЙЦЕВ**, аспірант ОНПУ, Одеса

**ДОСЛІДЖЕННЯ ОХОЛОДЖЕННЯ В'ЯЗКИХ НАФТОПРОДУКТІВ  
 ПРОТЯГОМ ЇХ ЗБЕРІГАННЯ ТА ТРАНСПОРТУВАННЯ В  
 ЗАЛІЗНИЧНИХ ЦИСТЕРНАХ**

В статті представлений комплекс заходів по транспортуванню, вивантаженню та зберіганню рідких, в'язких продуктів на прикладі нафтового бітуму. Виробництво бітуму в нафтохімічній галузі промисловості відбувається при порівняно високих температурах (~140–150 °С). При вказаних температурах цей матеріал знаходиться в рідкому стані й має в'язкість зіставну з в'язкістю води. У зв'язку з цим, транспортування бітуму від місця виробництва до місця споживання відбувається в залізничних цистернах (звичайні цистерни, цистерни-термоса, цистерни з паровою сорочкою). Цей матеріал різко збільшує в'язкість при зменшенні температури й частіше всього його вивантаження з цистерн без додаткового розігрівання стає неможливим. Найбільш складним питанням є визначення параметрів бітуму, який охолоджується при транспортуванні. Для цього треба правильно визначити коефіцієнт теплопередачі від гарячого бітуму через стінку цистерни в навколишнє середовища, також необхідно знати коефіцієнти тепловіддачі від бітуму до стінки й від стінки до оточуючого повітря при русі цистерни. Було розглянуто дві можливі фізичні моделі теплообміну бітуму з оточуючим середовищем. В подальшому необхідно провести натурні спостереження охолодження бітуму при русі цистерн на комплексі вивантаження та зберігання бітуму, а також лабораторні дослідження.

**Ключові слова:** теплообмін, коефіцієнт теплопередачі, конвекція, коефіцієнт тепловіддачі, температура.

**Вступ**

Виробництво бітуму в нафтохімічній галузі промисловості відбувається при порівняно високих температурах (~140–150 °С). При вказаних температурах цей матеріал знаходиться в рідкому стані й має в'язкість зіставну з в'язкістю води. У зв'язку з цим, транспортування бітуму від місця виробництва до місця споживання відбувається в залізничних цистернах (звичайні цистерни, цистерни-термоса, цистерни з паровою сорочкою). Цей матеріал різко збільшує в'язкість при зменшенні температури й частіше всього його вивантаження з цистерн без додаткового розігрівання стає неможливим.

**Мета роботи** – визначення температури матеріалу наприкінці транспортування при різних температурах зовнішнього повітря.

Найбільш важливим моментом є правильне визначення коефіцієнта теплопередачі від гарячого бітуму через стінку цистерни в навколишнє середовище. Для цього необхідно знати коефіцієнти тепловіддачі від бітуму до стінки й від стінки до оточуючого повітря при русі цистерни.

Вихідні дані для розрахунку:

- питома теплоємність бітуму .....  $c = 1,68 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$
- температура навколишнього середовища .....  $t_{\text{н}} = -15; -10; -5; 0; +10; +15 \text{ } ^\circ\text{C}$
- початкова температура бітуму .....  $t_{\text{б.н.}} = 140 \text{ } ^\circ\text{C}$
- маса бітуму в цистерні .....  $G = 57300 \text{ кг}$
- поверхня цистерни .....  $F = 92 \text{ м}^2$
- діаметр цистерни .....  $D = 2,8 \text{ м}$
- час цистерни в дорозі ...  $\tau = 4, 6, 8, 10 \text{ діб або } 96, 144, 192, 240 \text{ годин, відповідно}$

© С.С. Титар, Д.В. Зайцев, 2014

Для знаходження коефіцієнта теплопередачі від бітуму до стінки можливо використання відомої залежності (1)

$$Nu = 0,5 (Gr Pr)_{ж}^{0,25} \left( \frac{Pr_{ж}}{Pr_{ст}} \right)^{0,25} \quad (1)$$

Цю залежність було отримано для фізичної моделі  $I$ , яка відрізняється від дійсних умов, і справедлива для випадку вільної конвекції зовні циліндру, як показаний на рис. 1. В нашому випадку вільна конвекція має місце в середині циліндру.

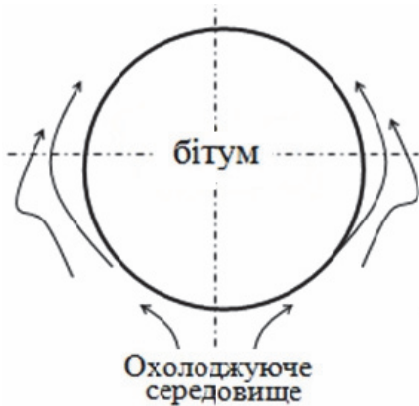


Рис. 1 – Фізична модель теплообміну  $I$  за формулою (1)

Коефіцієнт тепловіддачі від бітуму до стінки, враховуючи залежність (1),  $\alpha_1 = 2,0 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ . По залежності для вимушеної конвекції (повітря уздовж циліндра) визначають коефіцієнт тепловіддачі від цистерни до оточуючого повітря  $\alpha_2 = 14,2 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ . Нехтуючи термічним опором цистерни по залежності (2) одержують значення коефіцієнта теплопередачі  $k = 1,75 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2}} \quad (2)$$

Задаючи різний час в дорозі  $\tau$ , можна отримати температуру бітуму в пункті призначення

$$t_6 = t_B + \frac{t_H - t_B}{e \frac{Fk\tau}{Gc}} \quad (3)$$

по залежності (3)

Результати розрахунків температури матеріалу наприкінці транспортування за цією моделлю наведені у табл. 1 та на рис. 2.

Таблиця 1

Результати розрахунків температури матеріалу  $t_6$  наприкінці транспортування

$t_6, \text{ }^\circ\text{C}$	$\tau, \text{ год.}$			
$t_H, \text{ }^\circ\text{C}$	96	144	192	240
-15	72,0	50,1	33,8	21,5
-10	74,2	53,0	37,2	25,4
-5	76,3	55,9	40,6	29,2
0	78,5	58,8	44,1	33,0
10	82,9	64,6	50,9	40,6
15	85,1	67,5	54,3	44,5

Слід зазначити, що найбільш складним у цьому розрахунку є правильне визначення коефіцієнта тепловіддачі від бітуму до стінки цистерни. На вільну конвекцію бітуму в цистерні будуть накладатися коливання від розгойдування цистерни при русі, через що збільшуватиметься коефіцієнт тепловіддачі. З іншого боку, на стінці цистерни, внаслідок її охолодження, може утворюватися нерухомий

прилиплий шар бітуму, який при низькій теплопровідності бітуму буде зменшувати коефіцієнт теплопередачі. Крім того, безпосередньо в теплообміні з повітрям буде братися доля тільки 0,5 площі поверхні цистерни, інша половина захищена сорочкою. Правда, зовнішній шар сорочки буде отримувати тепло від поверхні цистерни (внутрішньої поверхні сорочки) випромінюванням і лише після цього буде віддавати тепло оточуючому повітрю.

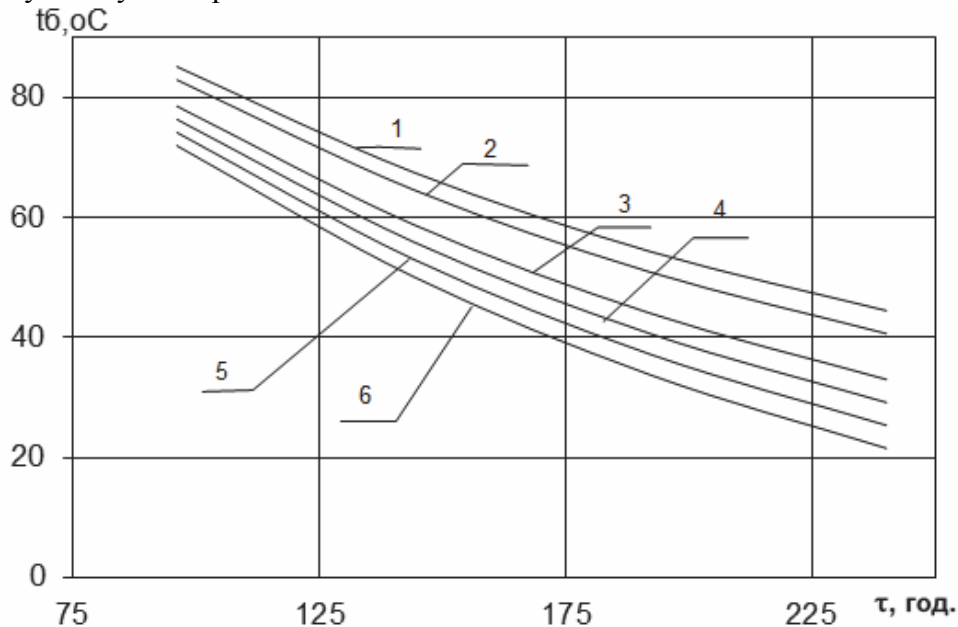


Рис. 2 – Температура бітуму в цистерні в залежності від температури зовнішнього повітря та часу транспортування:  
 1 –  $t_n = 15^\circ\text{C}$ ; 2 –  $t_n = 10^\circ\text{C}$ ; 3 –  $t_n = 0^\circ\text{C}$ ; 4 –  $t_n = -5^\circ\text{C}$ ; 5 –  $t_n = -10^\circ\text{C}$ ; 6 –  $t_n = -15^\circ\text{C}$

Є можливість спробувати визначити коефіцієнт теплопередачі, використовуючи іншу модель теплообміну між бітумом і стінкою цистерни, вважаючи стінку плоскою, як показано на рис. 3.

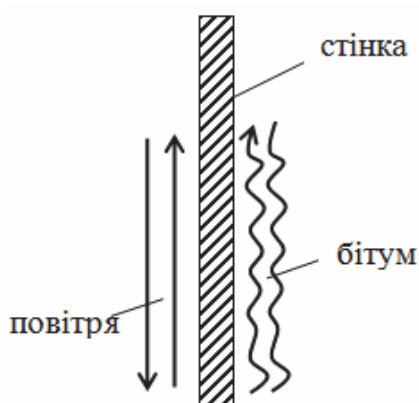


Рис. 3 – Фізична модель теплообміну 2, для цистерни з плоскою стінкою

Ця модель дещо ближче до реальної ситуації, проте не зовсім ясно, яким повинен бути визначальний геометричний розмір (діаметр цистерни чи  $\frac{1}{2}$  довжини кола). Враховуючи порівняно невелику кривизну поверхні цистерни, правильніше, з нашої точки зору, за визначальний розмір вибрати діаметр цистерни. Крім того, будемо вважати, що в поверхні цистерни з боку бітуму утворився прилиплий шар.

При знаходженні залежності для розрахунку коефіцієнта тепловіддачі від бітуму до стінки цистерни відповідно до цієї фізичної, необхідно визначити число Релея по залежності (4)

$$Ra_6 = Gr_6 \cdot Pr_6 \quad (4)$$

Для цього заздалегідь було визначено середню температуру стінки  $t_{cp}$  і різницю температур між температурою бітуму і температурою стінки цистерни  $\Delta t$ .

При цьому зроблено такі припущення. При достатньо тривалому часі в дорозі температура стінки, температура бітуму і температура навколишнього середовища стануть рівними. У початковий момент температура бітуму рівна 140 °С.

Коефіцієнт тепловіддачі від стінки цистерни в навколишнє середовище визначено по залежності (5)

$$\alpha_{\text{пов}} = 11,6 + 7\sqrt{\omega}, \quad (5)$$

де  $\omega$  – швидкість вітру, м/с.

Коефіцієнт теплопередачі в цьому випадку з урахуванням нерухомого шару бітуму біля стінки цистерни визначаємо по залежності (6)

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{\delta}} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_{\text{пов}}}}. \quad (6)$$

Результати розрахунків температури матеріалу наприкінці транспортування за цією моделлю наведені у табл. 2 і на рис. 4.

Таблиця 2

Результати розрахунків температури матеріалу  $t_{\delta}$  наприкінці транспортування

$t_{\delta}, \text{ }^{\circ}\text{C}$	$\tau, \text{ год.}$			
$t_{\text{н}}, \text{ }^{\circ}\text{C}$	96	144	192	240
-15	58,2	35,3	19,6	8,8
-10	61,3	39,2	23,9	13,4
-5	64,2	42,8	28,0	17,8
0	67,2	46,6	32,3	22,4
10	73,3	54,1	40,8	31,5
15	76,0	57,7	44,8	35,8

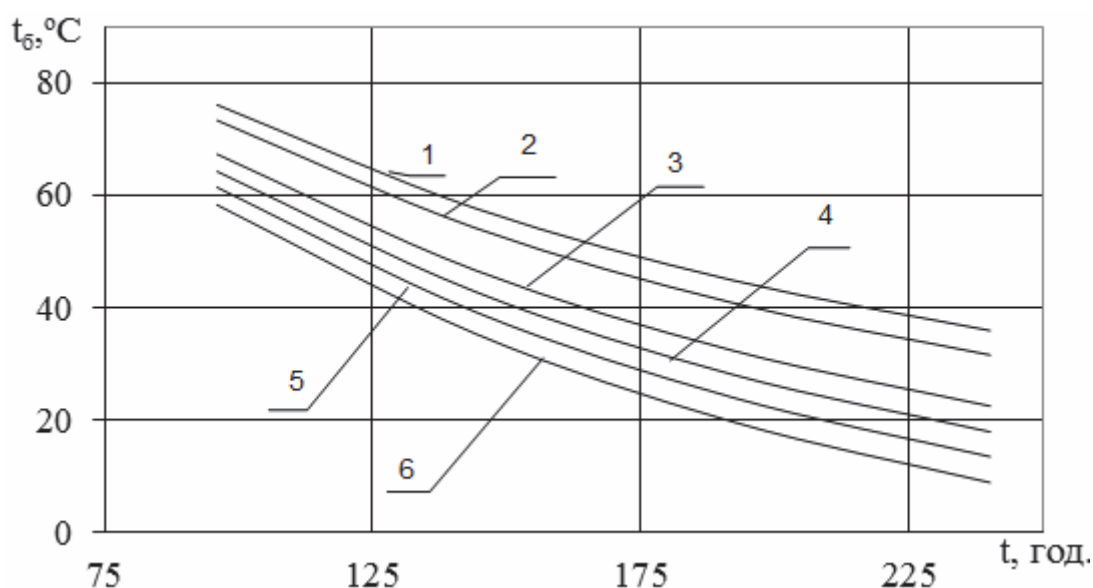


Рис. 4 – Температура бітуму в цистерні в залежності від температури зовнішнього повітря та часу транспортування:  
 1 –  $t_{\text{н}} = 15 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ; 2 –  $t_{\text{н}} = 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ; 3 –  $t_{\text{н}} = 0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ; 4 –  $t_{\text{н}} = -5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ; 5 –  $t_{\text{н}} = -10 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ; 6 –  $t_{\text{н}} = -15 \text{ }^{\circ}\text{C}$

На рис. 5 виконано порівняння розрахунків температури бітумів в цистерні в залежності від температури зовнішнього повітря та часу транспортування за різними моделями теплообміну.

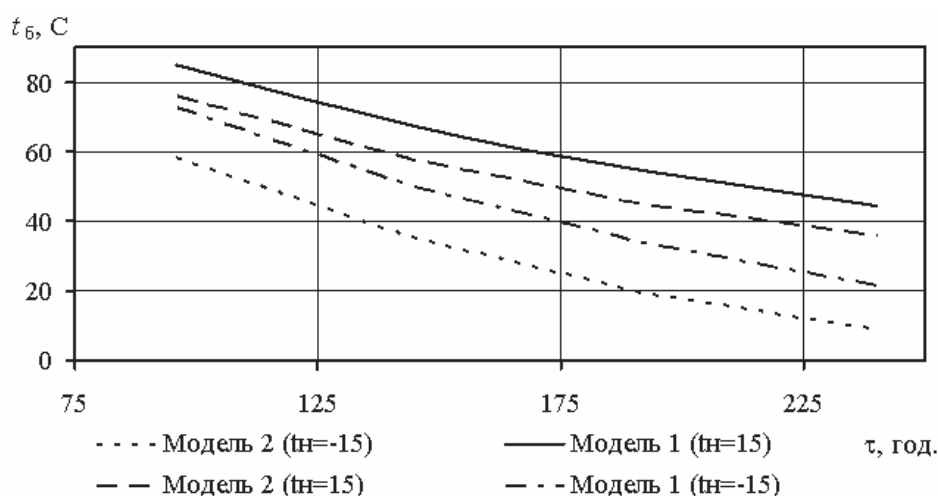


Рис. 5 – Порівняння розрахунків температури бітумів в цистерні в залежності від температури зовнішнього повітря та часу транспортування

### Висновки

1) Вперше зроблено аналіз рівнянь для розрахунку теплообміну між бітумом та навколишнім середовищем при транспортуванні у залізничних цистернах.

2) Опираючись на отримані данні треба констатувати, що температура бітуму, по ходу транспортування, неминуче падає, при чому за певною залежністю. Це дає нам можливість зрозуміти, як і коли бітум віддає, чи приймає тепло.

3) Аналізуючи різні фізичні моделі і порівнюючи результати, можна зазначити, що результати розрахунків за різними моделями будуть відрізнятися на 15...30 %.

4) На велику розбіжність між даними отриманими за різними моделями, мають великий вплив припущення, які неможливо ігнорувати.

5) Для підтвердження цих висновків потрібно провести експеримент на моделі чи в натурних умовах.

**Список літератури:** 1. Исаченко, В. П. Теплопередача [Текст] / В. П. Исаченко, В. А. Осипова, А. С. Сукомел. – Москва: Энергия, 1975. – 423 с. 2. Титар, С. С. Системы энергопостачання промислових підприємств [Текст] / С. С. Титар. – Одеса: АТ БАХВА, 2002. – 356 с. 3. Гун, Р. Б. Нефтяные битумы [Текст] / Р. Б. Гун. – Москва: Химия, 1989. – 323 с. 4. Левенберг, В. Д. Аккумуляция тепла [Текст] / В. Д. Левенберг, М. Р. Ткач, В. А. Гольстрем. – Киев: Техника, 1991. – 84 с.

**Bibliography (transliterated):** 1. Isachenko, V. P., V. A. Osipova and A.S. Sukomel. *Teploperedacha*. Moscow: Jenergija, 1975. Print. 2. Tytar, S. S. *Systemy energopostachannja promyslovyh pidpryjemstv*. – Odesa: AT BAHVA, 2002. Print. 3. Gun, R. B. *Neftjannye bitumu*. Moscow: Himija, 1989. Print. 4. Levenberg, V. D., M. R. Tkach and V. A. Gol'strem. *Akkumulirovanie tepla*. Kiev: Tehnika, 1991. Print.

Надійшла (received) 25.02.14