

УДК 662.6/9 (045)

<sup>1</sup>С.О. Пузік, к.т.н., доц.  
<sup>2</sup>А.В. Гвоздецький, пров. інж.

## УРАХУВАННЯ КОНВЕКТИВНИХ ПОТОКІВ, ЩО ВИНИКАЮТЬ У ПАЛИВІ ПІД ЧАС ЙОГО ВІДСТОЮВАННЯ В РЕЗЕРВУАРАХ

Національний авіаційний університет

<sup>1</sup>E-mail: s.puzik@email.ua<sup>2</sup>E-mail: tsvyah@ukr.net

*Складено систему рівнянь, яка описує розрахунок нагрівання палива від повітря навколишнього середовища в наземних, напівзаглиблених і заглиблених резервуарах. Запропоновано методику розрахунків конвективних потоків, які виникають у паливі під час його відстоювання при різному розташуванні резервуарів*

**Ключові слова:** відстоювання, конвективні потоки, паливо, резервуар.

### Постановка проблеми

Найбільш простим і доступним методом очищення палив є відстоювання, але воно ефективне лише за умови достатньої різниці в густин часток забруднень і палива.

Для відстоювання палив у резервуарах встановлена норма – 4 год на 1 м висоти наливу продукту в резервуар.

Таким чином, час осадження забруднень у резервуарі місткістю 50 м<sup>3</sup>, повністю наповненого паливом, становить більше 11 год.

Значна витрата часу на очищення палив у гравітаційному полі Землі є суттєвим недоліком цього методу.

Тривалість відстоювання залежить від швидкості осадження часток забруднень.

Для визначення швидкості відстоювання  $v$ , користуються формулою Стокса:

$$v = \frac{2R^2g}{9\eta}(\gamma_3 - \gamma_{\text{п}}), \quad (1)$$

де  $R$  – радіус частки забруднення, мкм;

$g$  – прискорення вільного падіння (9,81 м/с<sup>2</sup>);

$\eta$  – в'язкість палива, кгс·с/м<sup>2</sup>;

$\gamma_3$  – густина частки забруднення, кг/м<sup>3</sup>;

$\gamma_{\text{п}}$  – густина палива, кг/м<sup>3</sup>.

Отже, швидкість осадження залежить від:  
 – густини часток забруднення;

– в'язкості;

– густини палива.

Розрахункові значення, отримані за формулою (1) для наземних резервуарів, не точні і в переважно не відповідають дійсності [1].

Крім того, при цих розрахунках не враховуються інші фактори, які суттєво впливають на швидкість і кількісний склад часток, які осідають.

Одним із таких факторів є вплив на частки забруднень, що осідають, конвективних потоків, які виникають в паливі при зміні його температури в резервуарі.

### Аналіз досліджень і публікацій

На основі експериментальних даних Н.Н. Константинов установив, що частина тепла, яка отримується стінкою наземного резервуара внаслідок сонячної радіації, переходить від стінки до палива [2]. При цьому до прилеглого до стінки шару продукту виникають висхідні потоки, які виносять на поверхню з нижніх шарів частину палива разом із забрудненнями.

Верхні шари продукту нагріваються за рахунок тепла, що отримується від газового простору й оточуючих його стінок та даху.

Температура верхніх шарів деякий час буває вище температури навколишнього повітря.

Температура бокової стінки у верхньому шарі продукту з тіньової сторони буває нижча температури у прилеглих шарах палива. Це призводить до виникнення у стінки (з тіньової сторони) спадного конвективного потоку, що захоплює верхній шар продукту відповідної товщини (менший, ніж при висхідному потоці) і опускає деяку кількість палива з верхнього в нижні шари.

Для розрахунку максимально можливої витрати продукту у висхідному конвективному потоці на сонячній стороні резервуара на деякій глибині  $h$  Н. Н. Константинов рекомендує таку формулу:

$$G_{\max} = \frac{\pi D q}{2C \frac{dt}{dx} h},$$

де  $\pi$  – константа (3,14);

$D$  – діаметр резервуара, м;

$q$  – середній питомий тепловий потік через стінку на висоті  $h$ , ккал/(м<sup>3</sup> · год);

$C$  – питома теплоємність палива, ккал/(кг · °С);

$\frac{dt}{dx}$  – зміна температури по вертикалі резервуара (рис. 1).

Витрата продукту  $G_{\max}$ , а отже, і швидкість висхідного потоку залежать від величини похідної  $\frac{dt}{dx}$ .

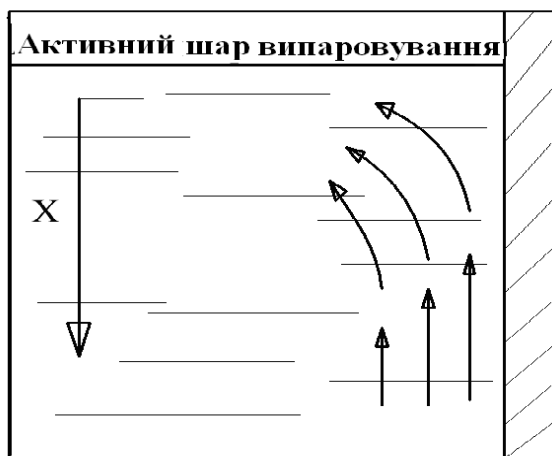


Рис. 1 Схема конвективних потоків біля стінки горизонтальних наземних резервуарів

Оскільки  $\frac{dt}{dx}$  збільшується в напрямку від дна резервуара до поверхні продукту, то  $G_{\max}$  і швидкість потоку більша в нижніх шарах та менша у верхніх шарах палива.

Таким чином, паливо постійно знаходиться в резервуарах у русі, швидкість якого залежить від інтенсивності сонячної радіації.

Забруднення залучаються в цей рух, тому відокремлення їх від палива шляхом відстоювання є малоефективним.

**Мета** роботи – для уточнення швидкості відстоювання палива в резервуарах з урахуванням сил конвективних потоків скласти систему рівнянь, яка описує розрахунок нагрівання від сонячної радіації палива в наземних, напівзаглиблених і заглиблених резервуарах.

### Розрахунок нагрівання палива в наземних, напівзаглиблених і заглиблених резервуарах

Для розрахунку кількості тепла, що йде на нагрів визначеної кількості палива в резервуарі від початкової температури  $t_n$  до кінцевої  $t_k$  залежно від температури повітря навколишнього середовища  $t_n$ , необхідно визначити сумарну складову теплових потоків сонячних променів у визначеному об'ємі палива.

У загальному випадку повну кількість тепла, що йде на нагрів палива,  $q$  визначають за формулою [3]:

$$q = Gc(t_k - t_n) + KF\tau(t_n - t_{\text{сер}}),$$

де  $G$  – вага палива, кг;

$K$  – повний коефіцієнт теплопередачі від навколишнього середовища до палива, ккал/(м<sup>2</sup> · год · °С);

$F$  – площа поверхні нагріву, м<sup>2</sup>;

$\tau$  – час нагріву палива, с;

$t_{\text{сер}}$  – середня температура палива, °С;

$$t_{\text{сер}} = \frac{1}{2}(t_n + t_k).$$

Кінцеву температуру  $t_k$  палива в резервуарі після нагріву за час  $\tau$  можна визначити:

$$t_k = t_n + (t_n - t_{п}) e^{\frac{KF\tau}{GC}}$$

Найбільшою складністю для підрахунку величини повної кількості тепла  $q$  є визначення повного коефіцієнту теплопередачі від температури повітря навколишнього середовища до палива  $K$ .

Значення  $K$  можна визначити тільки з урахуванням характеру теплопередачі через поверхню резервуара (стінка, дно, дах).

Як відомо, є три види розташування резервуарів:

- наземний (рис. 2);
- напівзаглиблений (рис. 3);
- заглиблений (рис. 4).

Слід розглядати кожен тип окремо, оскільки характер теплопередачі через поверхню цих резервуарів буде різним.

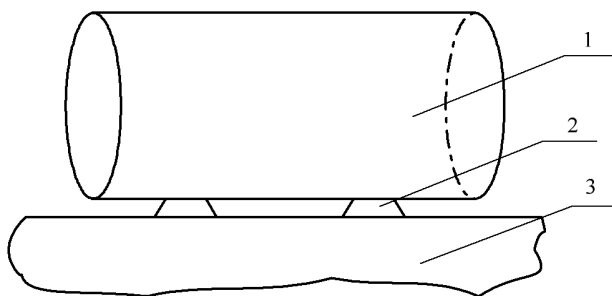


Рис. 2. Наземний резервуар

- 1 – резервуар;
- 2 – стійка резервуара;
- 3 – ґрунт

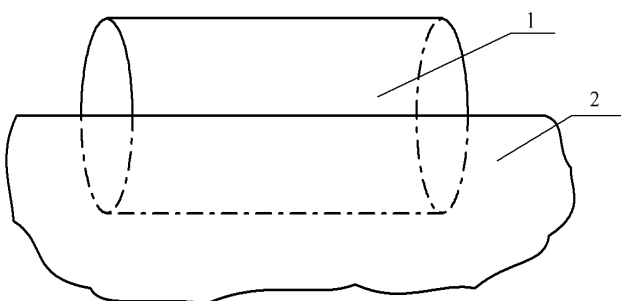


Рис. 3. Напівзаглиблений резервуар:

- 1 – резервуар;
- 2 – ґрунт

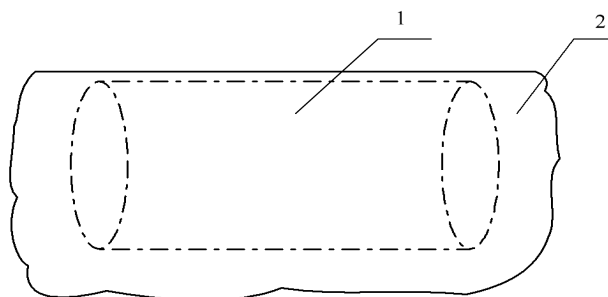


Рис. 4. Заглиблений резервуар:

- 1 – резервуар;
- 2 – ґрунт

Для наземних резервуарів повний коефіцієнт теплопередачі від навколишнього середовища до палива  $K$  визначають за формулою

$$K = \frac{K_{ст} F_{ст} + K_{дн} F_{дн} + K_{д} F_{д}}{F_{ст} + F_{дн} + F_{д}},$$

де  $K_{ст}$ ,  $K_{дн}$ ,  $K_{д}$  – коефіцієнти теплопередачі через стінку, дно і дах резервуара відповідно, ккал/(м<sup>2</sup> · год · °С);

$F_{ст}$ ,  $F_{дн}$ ,  $F_{д}$  – площі поверхні стінки, дна і даху резервуара відповідно, м<sup>2</sup>.

Коефіцієнти теплопередачі через стінку  $K_{ст}$  наземного резервуара визначають за формулою

$$K_{ст} = \frac{1}{\frac{1}{a_1} + \sum_{i=1}^{i=n} \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{a_2}}, \quad (2)$$

де  $a_1$ ,  $a_2$  – внутрішній і зовнішній коефіцієнти теплопередачі для резервуарів, ккал/(м<sup>2</sup> · год · °С);

$\delta_i$  – товщина листів  $i$ -го шару стінки металу резервуара, м;

$\lambda_i$  – коефіцієнт теплопередачі  $i$ -го шару стінки металу резервуара, ккал/(м<sup>2</sup> · год · °С).

Значення внутрішнього коефіцієнта теплопередачі  $a_1$  визначаємо за емпіричною формулою

$$a_1 = \varepsilon \frac{\lambda_p}{d} (\text{GrPr})^n,$$

де  $\varepsilon$ ,  $n$  – сталі коефіцієнти, які залежать від критеріїв GrPr (див. таблицю);

$\lambda_p$  – коефіцієнт теплопередачі резервуара, ккал/(м<sup>2</sup>·год·°C);

$d$  – діаметр резервуара, м.

#### Значення коефіцієнтів $\varepsilon$ , $n$

GrPr	$\varepsilon$	$n$
$10^{-3} - 5 \cdot 10^3$	1,18	0,125
$5 \cdot 10^3 - 2 \cdot 10^7$	0,54	0,25
$2 \cdot 10^7 - 10^{13}$	0,135	0,33

Зовнішній коефіцієнт теплопередачі  $a_2$  слід приймати з урахуванням не тільки конвекції, але й випромінювання:

$$a_2 = a_k + a_b,$$

де  $a_k$ , – коефіцієнт конвекції резервуара, ккал/(м<sup>2</sup>·год·°C);

$a_b$  – коефіцієнт випромінювання резервуара, ккал/(м<sup>2</sup>·год·°C).

Для орієнтовних розрахунків величину  $K_{ст}$  для наземних резервуарів можна приймати  $K_{ст} = 3 - 5$  ккал/(м<sup>2</sup>·год·°C).

Для визначення коефіцієнта теплопередачі через дно резервуара  $K_{дн}$  використовуємо формулу

$$K_{дн} = \frac{1}{\frac{1}{a_1} + \sum_{i=1}^{i=n} \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{\pi D}{8\lambda_{гр}}}, \quad (3)$$

де,  $\lambda_{гр}$  – коефіцієнт теплопровідності ґрунту, ккал/(м<sup>2</sup>·год·°C).

Коефіцієнт теплопередачі через дах резервуара  $K_0$  визначається з рівняння

$$K_0 = \frac{1}{\frac{1}{a_1'} + \frac{\delta_2}{\lambda_{ек}} + \sum_{i=1}^{i=n} \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{a_2}}, \quad (4)$$

де  $a_1'$  – коефіцієнт теплопередачі від поверхні палива в газовий простір резервуара, ккал/(м<sup>2</sup>·год·°C);

$\delta_2$  – товщина газового простору над верхню палива, м;

$\lambda_{ек}$  – еквівалентний коефіцієнт теплопровідності газоповітряної суміші, ккал/(м<sup>2</sup>·год·°C):

$$\lambda_{ек} = \varepsilon_k \lambda_{пов},$$

де  $\varepsilon_k$  – коефіцієнт конвекції для повітря;

$\lambda_{пов}$  – коефіцієнт теплопровідності повітря, ккал/(м<sup>2</sup>·год·°C).

Для повітря коефіцієнт конвекції  $\varepsilon_k$  визначають за формулою

$$\varepsilon_k = A \delta_2^4 \sqrt{\frac{t_3 - t_d}{\delta_2}},$$

де  $A$  – коефіцієнт, що дорівнює 19,4; 16,7; 14,8 за температури газу 0; 50; 100 °C відповідно;

$t_3$  – температура поверхні палива в резервуарі, °C;

$t_d$  – температура даху резервуару, °C.

Для наземних резервуарів коефіцієнти  $K_д$  та  $K_{дн}$  в багато разів менші за коефіцієнт  $K_{ст}$ , тому при розрахунках, які не потребують великої точності, величиною  $K_д$  та  $K_{дн}$  можна знехтувати.

Орієнтовно приймається:

$$K_д = 0,5 \text{ ккал/(м}^2 \cdot \text{год} \cdot \text{°C)};$$

$$K_{дн} = 1 \text{ ккал/(м}^2 \cdot \text{год} \cdot \text{°C)}.$$

Повний коефіцієнт теплопередачі від навколишнього середовища до палива  $K$  для напівзаглибленого резервуара визначають за формулою

$$K = \frac{K_{ст}'' F_{п} + K_{ст}' F_{гр}}{F_{п} + F_{гр}},$$

де  $K_{ст}^n$ ,  $K_{ст}^{гp}$  – коефіцієнти теплопередачі через стінку в повітря і ґрунт відповідно для напівзаглиблених резервуарів, ккал/(м<sup>2</sup>·год<sup>0</sup>С);

$F_n$ ,  $F_{гp}$  – площа поверхні стінок напівзаглиблених резервуарів стичних з повітрям та ґрунтом відповідно, м<sup>2</sup>.

Значення коефіцієнта  $K_{ст}^n$  знаходимо з виразів (1), (2), (3), оскільки напівзаглиблений резервуар розташований на 50 % в ґрунті та на 50 % на поверхні:

$$K_{ст}^n = \frac{\frac{1}{2} K_{ст} F_{ст} + K_d F_d}{\frac{1}{2} F_{ст} + F_d}.$$

Значення коефіцієнта  $K_{ст}^{гp}$  знаходимо за формулою

$$K_{ст}^{гp} = \frac{1}{\frac{1}{a_1} + \sum_{i=1}^{i=n} \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{h_0}{2\lambda_{гp}} + \frac{1}{a_{2 \rightarrow n}}},$$

де  $h_0$  – глибина занурення резервуара в ґрунт, м;

$a_{2 \rightarrow n}$  – коефіцієнт теплопередачі від поверхні ґрунту в повітря, ккал/(м<sup>2</sup>·год<sup>0</sup>С):

$$a_{2 \rightarrow n} = 10-15 \text{ ккал/(м}^2 \cdot \text{год}^0 \text{С)}.$$

Повний коефіцієнт теплопередачі від навколишнього середовища до палива  $K$  для заглибленого резервуару визначаємо за формулою

$$K = \frac{1}{\frac{1}{a_1} + \sum_{i=1}^{i=n} \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{a_{2 \rightarrow гp}}},$$

де  $a_{2 \rightarrow гp}$  – коефіцієнт теплопередачі від поверхні резервуара через ґрунт в атмосферне повітря, ккал/(м<sup>2</sup>·год<sup>0</sup>С):

$$a_{2 \rightarrow гp} = 4 - 6 \text{ ккал/(м}^2 \cdot \text{год}^0 \text{С)}.$$

## Висновки

1. Важливим фактором, що впливає на швидкість відстоювання палив у резервуарах, є конвективні потоки часток забруднень, які виникають унаслідок нагрівання палива в резервуарі від температури навколишнього середовища. Величина конвективних потоків у паливі залежить від теплопередачі від температури повітря навколишнього середовища до палива.

2. Складено і розв'язано систему рівнянь, яка описує розрахунок нагрівання палива від температури навколишнього середовища в наземних, напівзаглиблених і заглиблених резервуарів.

## Література

1. Пузік С. О. Визначення швидкості та часу відстоювання реактивних палив / С. О. Пузік, А. В. Гвоздецький // Проблеми тертя та зношування: наук.-техн. зб. – К.: НАУ-друк, 2010. – № 52. – 178–184 с.

2. Литвинов А. А. Технология и техника заправки воздушных судов / А. А. Литвинов, А. М. Ипатов. – М.: Машиностроение, 1976. – 176 с.

3. Коршунов Е. С. Промысловый транспорт нефти и газа / Е. С. Коршунов, С. Г. Едигаров. – М.: Недра, 1975. – 296 с.

Стаття надійшла до редакції 10.10.2011.