

УДК 681.5:620.165.29.008.6(075.8)

З. А. Стоцько, Р. М. Шеремета
Національний інститут “Львівська політехніка”

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ЕРОЗІЙНОГО ЗНОШУВАННЯ ЕЛЕМЕНТІВ КЛАПАННИХ УЩІЛЬНЕНЬ

© Стоцько З. А., Шеремета Р. М., 2018

<https://doi.org/10.23939/istcipa2018.52.095>

Мета. Вивчення кінетики ерозійного руйнування елементів клапанного ущільнення під час перетікання робочих середовищ з високими енергетичними параметрами. **Методика.** За об’єкт досліджень обрано запірно-регулюючі елементи клапанного ущільнення, а саме – клапан і сідло. Побудовано модель гідроерозійного зносу руйнування цих елементів. При цьому описано комплекс конструктивних параметрів запірних вузлів, а також параметрів, що відображають фізичні властивості робочого середовища і матеріалу пари клапан - сідло. Застосовано π -теорему подібності і метод аналізу розмірностей для побудови моделі процесу зношування конструктивних елементів клапанного ущільнення. Для визначення невідомих параметрів моделі експериментальне дослідження ерозійного процесу запропоновано проводити двома шляхами: за підтримування постійного перепаду тисків на клапанному ущільненні; за підтримування постійних витрат робочого середовища через клапанне ущільнення. **Результати.** Запропоновано вираз об’єму зношування за умови однакової твердості матеріалів клапана і сідла. Визначено залежність швидкості ерозійного руйнування від комплексу параметрів. Отримано вираз, за яким визначається зміна глибини ерозійного зносу ущільнювальних поверхонь у часі. Обґрунтовано значення максимально можливої глибини ерозійного зносу елементів клапанної пари. Представлено коефіцієнти відносного зростання витрат, відносної зміни тиску на ущільненні, що пов’язані зі зношуванням поверхонь ущільнювальних елементів системи клапан - сідло. **Наукова новизна.** Вперше представлено коефіцієнти гідроерозійного зносу елементів клапанного ущільнення, що характеризуються відносним зростанням витрат і відносною зміною тиску на ущільненні. **Практична значущість.** Запропоновано алгоритм визначення швидкості зношування елементів клапанного ущільнення на основі розрахунку значення коефіцієнта гідроерозійного руйнування елементів конкретної трубопровідної арматури, що дає можливість визначити сумарний об’єм зношування протягом визначеного часу роботи.

Ключові слова: клапанне ущільнення, клапан-сідло, ерозія, π -теорема подібності, швидкість зношування, глибина зношування.

Вступ. У сучасному технологічному обладнанні широко застосовують гідро- та пневмо-системи, що забезпечують функціонування процесів, пов’язаних з використанням робочих середовищ високих енергетичних параметрів [1]. Під час експлуатації таких систем виникає ерозійне руйнування ущільнювальних поверхонь елементів клапан-сідло. Це призводить до зміни гідравлічних характеристик регулюючої (дросельної), розподільчої та запірної трубопровідної арматури і у результаті – до відмови в роботі цілої системи [2].

Мета. Метою роботи є вивчення кінетики ерозійного руйнування елементів клапанного ущільнення під час перетікання робочих середовищ з високими енергетичними параметрами.

Методика проведення досліджень. Для визначення чинників, що призводять до ерозійного руйнування елементів гідроарматури, необхідно дослідити процес перетікання рідини через щільний зазор клапанного затвору.

Будуючи модель гідроерозійного зносу ущільнювальних елементів, необхідно враховувати комплекс параметрів, що відображають фізичні властивості рідини і матеріалу ущільнювальних елементів, режими роботи гідравлічної системи, а також конструктивні параметри клапанів [3,7].

Для перепускнуої системи клапан-сідло, схему якої зображено на рис. 1, такими параметрами роботи можуть бути [9]:

- ρ – густина робочої рідини, кг/м^3 [L^{-3}M];
- μ – динамічна в'язкість рідини, $\text{Па} \cdot \text{с}$ [$\text{L}^{-1}\text{MT}^{-1}$];
- Q – витрати робочої рідини, $\text{м}^3/\text{с}$ [L^3T^{-1}];
- H – твердість матеріалу сідла клапана, Па [$\text{L}^{-1}\text{MT}^{-2}$];
- V – швидкість руху рідини відносно поверхні ущільнення, м/с [LT^{-1}];
- t – час роботи ущільнення, с [T].

Знос ущільнювальної поверхні можна оцінювати об'ємом видаленої (зруйнованої) поверхні сідла і клапана за час роботи елемента арматури. Позначимо символом Z швидкість об'ємного ерозійного зношування ущільнювальних поверхонь, $\text{м}^3/\text{с}$ [L^3T^{-1}]. Цей параметр залежить від конструктивного виконання клапанної пари, а також від чинника фізико-хімічної взаємодії робочої рідини з матеріалом ущільнювальних елементів клапанної пари.

Враховуючи, що в'язкість і густина робочої рідини, витрати і швидкість руху рідини – величини взаємопов'язані, представимо величину зносу за одиницю часу у вигляді степеневі залежності

$$Z = k\mu^a H^b V^c, \quad (1)$$

де k , a , b , c , – невідомі числові коефіцієнти.

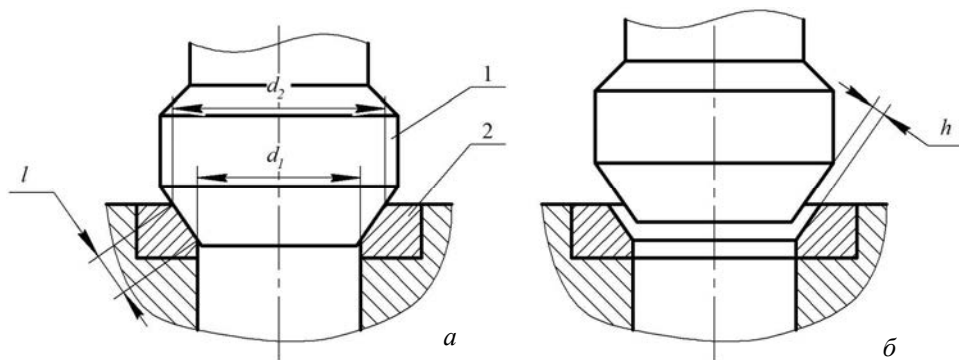


Рис. 1. Схема клапанного ущільнення в замкненому стані (а) і в процесі перепускання робочого середовища (б): 1 – клапан; 2 – сідло

Fig. 1. Scheme of valve seal in the closed state (a) and in the process of passing the working medium (b): 1 – valve; 2 – saddle

Для визначення цієї залежності застосуємо π -теорему подібності і метод аналізу розмірностей. Рівняння (1) є повним рівнянням фізичного процесу зносу поверхні сідла, а k – коефіцієнт пропорційності. Підставивши значення розмірностей, отримаємо

$$\text{L}^3\text{T}^{-1} = (\text{L}^{-1}\text{MT}^{-1})^a (\text{L}^{-1}\text{MT}^{-2})^b (\text{LT}^{-1})^c (\text{T})^d.$$

Звідси знаходимо:

$$a = 2; b = -2; c = 3.$$

Отже, швидкість зношування ущільнювальних елементів клапанної пари визначають за формулою

$$Z = k \frac{\mu^2 V^3}{H^2}, \quad (2)$$

де k – безрозмірний коефіцієнт зносу, який визначають експериментально; V – швидкість руху рідини, яку визначають з врахуванням витрат рідини Q через переріз кільцевого зазору S між сідлом і клапаном

$$V = \frac{Q}{S},$$

де Q – витрати робочої рідини; S – площа поперечного перерізу зазору між сідлом і клапаном, $S = \pi Dh$. Тут D – діаметр контактної циліндричної поверхні, $D = \frac{d_1 + d_2}{2}$; h – величина зазору між клапаном і сідлом (рис. 1, б).

Тобто, швидкість ерозійного зношування ущільнювальних елементів можна визначити за формулою

$$Z = k \frac{\mu^2 Q^3}{(\pi Dh)^3 H^2} \quad (3)$$

Тоді сумарний об'єм зносу Ω протягом часу t роботи ущільнення:

$$\Omega = Z \cdot t = k \frac{\mu^2 Q^3}{(\pi Dh)^3 H^2} \cdot t \quad (4)$$

Якщо розглядати зазор між клапаном і сідлом у вигляді кільцевої щілини, то об'єм зносу, за умови однакової твердості матеріалів клапана і сідла, можна подати у вигляді

$$\Omega = 2\pi D l \delta, \quad (5)$$

де δ – глибина ерозійного руйнування поверхні ущільнювальних елементів клапанної пари; l – ширина клапанного зазору в напрямку перетікання робочого середовища.

Наявність дослідних даних дає змогу математично описати процес ерозії щілини внаслідок руху робочої рідини. При перетіканні рідини через щілину товщина ерозійного шару δ на поверхні ущільнювальних елементів, збільшуючись з часом, прагне до деякої граничної величини (рис. 2). Це пояснюється тим, що із зростанням зазору h за постійних витрат Q робочої рідини спадає швидкість її руху у щілині, а це, за виразом (2) в кубічній залежності зменшує швидкість ерозійного зношування. Зміну товщини ерозійного руйнування в часі ущільнювальних поверхонь можна описати залежністю [4]

$$\delta = \delta_{\max} (1 - e^{-\alpha t}), \quad (6)$$

де δ_{\max} – максимально можлива товщина ерозійного руйнування; t – час від початку протікання середовища; α – коефіцієнт пропорційності, що залежить від типу рідини і матеріалу елементів ущільнення; e – основа натурального логарифма.

З формули видно, що при $t \rightarrow \infty$ товщина ерозійно зруйнованого шару $\delta \rightarrow \delta_{\max}$, а при $t \rightarrow 0$ $\delta \rightarrow 0$. У такому випадку коефіцієнт зношування ущільнювальних елементів k у виразі (4) являє собою функціонал часу і з використанням виразу (5) визначається як

$$k = \frac{2(\pi D)^4 H^2 l}{\mu^2 Q^3 t} \cdot \delta_{\max} (1 - e^{-\alpha t}) \cdot [h_0 + 2\delta_{\max} (1 - e^{-\alpha t})]^3 \quad (7)$$

Витрати через клапанну пару у початковий момент проливу Q_0 (при $t = 0$) для в'язкісного режиму перетікання описують рівнянням Пуазейля [5,6]:

$$Q_0 = \frac{\pi D h_0^3 p}{8\mu l}, \quad (8)$$

де h_0 – величина початкового зазору; l – ширина клапанного зазору в напрямку перетікання середовища; p – різниця тисків між входом і виходом клапанного ущільнення у початковий момент проливу.

Внаслідок ерозійного зношування швидкість руху робочого середовища через клапанне ущільнення змінюватиметься з часом [8], тому що змінною буде величина зазору $h = h_0 + 2\delta = h_0 + 2\delta_{\max} (1 - e^{-\alpha t})$, отже

$$Q = \frac{\pi D p}{8\mu l} [h_0 + 2\delta_{\max} (1 - e^{-\alpha t})]^3 \quad (9)$$

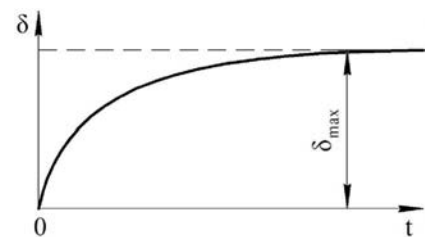


Рис. 2. Залежність зміни товщини ерозійного шару від часу проливу

Fig. 2. Dependence of change in the thickness of the erosion layer from the time of the flow

У виразі (7) невідомими параметрами ерозійного процесу є δ_{\max} і α , які в результаті визначають коефіцієнт зносу k . Визначити ці невідомі параметри можна експериментальним дослідженням ерозійного процесу. Це можна здійснити двома шляхами:

- 1) підтримуючи постійний перепад тисків між входом і виходом клапанного ущільнення;
- 2) підтримуючи постійними витрати робочого середовища через клапанне ущільнення.

Результати досліджень та їх обговорення

1. Визначення параметрів ерозійного процесу стабілізацією перепаду тисків на клапанному ущільненні

Підтримуючи значення перепаду тисків p постійним і нехтуючи зміною довжини зазору πD , спричиненого руйнуванням, витрату Q із врахуванням (8) і (9) можна подати залежністю

$$Q = \frac{\pi D h_0^3 \Delta p}{8 \mu l} \left[1 + \frac{2 \delta_{\max}}{h_0} (1 - e^{-\alpha t}) \right]^3 = Q_0 \left[1 + \frac{2 \delta_{\max}}{h_0} (1 - e^{-\alpha t}) \right]^3. \quad (10)$$

Відносне зростання витрат, пов'язане зі зношуванням поверхонь ущільнювальних елементів системи клапан-сідро, представимо показником $v = \frac{Q - Q_0}{Q_0}$. Тоді з врахуванням (10) відносне зростання витрат визначається залежністю

$$v = \left[1 + \frac{2 \delta_{\max}}{h_0} (1 - e^{-\alpha t}) \right]^3 - 1. \quad (11)$$

При $t = 0$ $v = 0$, при $t \rightarrow \infty$ величина $v \rightarrow v_{\max}$, вона стабілізується, і за виразом (11) отримаємо

$$v_{\max} = \left[1 + \frac{2 \delta_{\max}}{h_0} \right]^3 - 1. \quad (12)$$

Під час експериментальних досліджень за критерій стабілізації витрат робочого середовища можна обрати таке значення v , за якого $\frac{dv}{dt} \leq 0,1\% \cdot \frac{dv}{dt} \Big|_{t=0}$. За рівнянням (12) можна визначити максимально можливу товщину ерозійного зносу матеріалу елементів клапанної пари:

$$\delta_{\max} = \frac{h_0}{2} \left(\sqrt[3]{v_{\max} + 1} - 1 \right). \quad (13)$$

Для визначення величини коефіцієнта пропорційності α (параметра ерозійного зносу) знайдемо похідну виразу (11) за часом t :

$$\frac{dv}{dt} = 3\alpha e^{-\alpha t} \frac{2 \delta_{\max}}{h_0} \left[1 + \frac{2 \delta_{\max}}{h_0} (1 - e^{-\alpha t}) \right]^2$$

при $t = 0$, $e^{-\alpha t} = 1$, тоді

$$\frac{dv}{dt} \Big|_{t=0} = 3\alpha \frac{2 \delta_{\max}}{h_0}.$$

Тобто

$$\alpha = \frac{1}{3} \left[(v_{\max} + 1)^{\frac{1}{3}} - 1 \right]^{-1} \cdot \frac{dv}{dt} \Big|_{t=0}. \quad (14)$$

Залежність відносного зростання витрат через клапанний зазор від часу проливу будують під час експериментальних досліджень (рис. 3).

За цим графіком (рис. 3) можна визначити значення v_{\max} , а також $\frac{dv}{dt} \Big|_{t=0}$, графічно диференціювати криву у відповідній точці

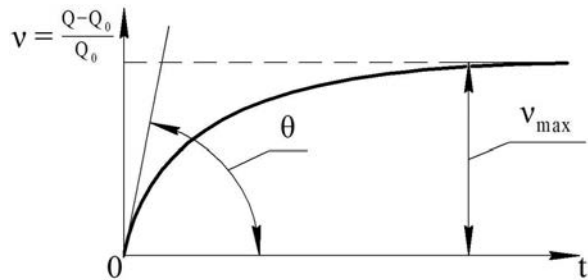
$$\left. \frac{dv}{dt} \right|_{t=0} = \operatorname{tg} \theta ,$$

отже, параметр ерозійного зносу α визначають на підставі експериментальних даних за формулою

$$\alpha = \frac{1}{3} \left[(v_{\max} + 1)^{\frac{1}{3}} - 1 \right]^{-1} \cdot \operatorname{tg} \theta .$$

Рис. 3. Залежність відносної зміни витрат у процесі ерозійного зношування від часу проливу:
 θ – кут нахилу дотичної до кривої у точці $t = 0$

Fig. 3. Dependence of the relative change of costs in the process of erosion wear from the time of the flow: θ – angle of inclination of the tangent to the curve at the point $t = 0$



Враховуючи (13) і (14), знаходимо за рівнянням (7) для кожної конкретної системи робоча рідина-клапанне ущільнення значення функціоналу k . Це дає можливість за формулою (3) визначити швидкість зношування ущільнювальних елементів, а отже, сумарний об'єм зношування (4) протягом визначеного часу роботи ущільнення.

2. Визначення параметрів ерозійного процесу шляхом стабілізації витрат через клапанне ущільнення

У разі підтримання постійними витрат робочого середовища Q_0 , через клапанне ущільнення, нехтуючи зміною довжини зазору πD , спричиненого руйнуванням, різниця падіння тисків між входом і виходом клапанного ущільнення в процесі ерозійного зношування змінюватиметься, що з врахуванням (8) і (10) можна подати залежністю

$$p = \frac{8Q_0 \mu l}{\pi D h_0^3} \left[1 + \frac{2\delta_{\max}}{h_0} (1 - e^{-\alpha t}) \right]^{-3} = p_0 \left[1 + \frac{2\delta_{\max}}{h_0} (1 - e^{-\alpha t}) \right]^{-3} . \quad (15)$$

Відносне зменшення перепаду тисків на клапанному ущільненні, пов'язане зі зношуванням поверхонь ущільнювальних елементів системи клапан-сідло, подамо показником $\gamma = \frac{p_0 - p}{p_0}$. Тоді з врахуванням (15) відносна зміна тиску на ущільненні визначається залежністю

$$\gamma = 1 - \left[1 + \frac{2\delta_{\max}}{h_0} (1 - e^{-\alpha t}) \right]^{-3} . \quad (16)$$

При $t = 0$ $\gamma = 0$, при $t \rightarrow \infty$ величина $\gamma \rightarrow \gamma_{\max}$, вона стабілізується, і за виразом (16) отримаємо

$$\gamma_{\max} = 1 - \left(1 + \frac{2\delta_{\max}}{h_0} \right)^{-3} . \quad (17)$$

Під час експериментальних досліджень як критерій стабілізації зміни тиску в процесі ерозії можна обрати таке значення γ , за якого $\left. \frac{d\gamma}{dt} \right|_{t=0} \leq 0,1\% \cdot \frac{d\gamma}{dt} \Big|_{t=0}$. За рівнянням (17) можна визначити максимально можливу товщину ерозійного зносу матеріалу елементів клапанної пари:

$$\delta_{\max} = \frac{h_0}{2} \left[(1 - \gamma_{\max})^{\frac{1}{3}} - 1 \right] . \quad (18)$$

Для визначення величини коефіцієнта пропорційності α знайдемо похідну виразу (16) за часом t :

$$\frac{d\gamma}{dt} = 3\alpha e^{-\alpha t} \frac{2\delta_{\max}}{h_0} \left[1 + \frac{2\delta_{\max}}{h_0} (1 - e^{-\alpha t}) \right]^{-4}$$

при $t = 0$, $e^{-\alpha t} = 1$, тоді

$$\left. \frac{d\gamma}{dt} \right|_{t=0} = 3\alpha \frac{2\delta_{\max}}{h_0}.$$

Тобто

$$\alpha = \frac{1}{3} \left[(1 - \gamma_{\max})^{-\frac{1}{3}} - 1 \right]^{-1} \cdot \left. \frac{d\gamma}{dt} \right|_{t=0}. \quad (19)$$

Залежність відносного зменшення перепаду тисків від часу проливу робочого середовища через клапанний зазор визначають під час експериментальних досліджень (рис. 4).

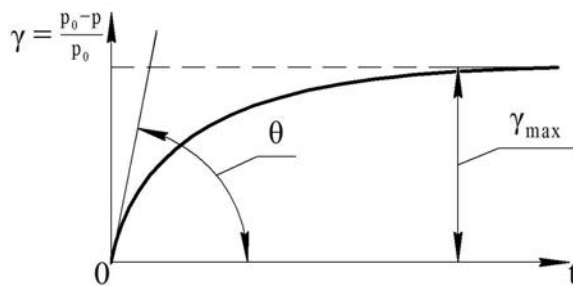


Рис. 4. Залежність відносної зміни перепаду тисків у процесі ерозійного зношування від часу проливу: θ – кут нахилу дотичної до кривої у точці $t = 0$

Fig. 4. Dependence of the relative change in the pressure drop in the process of erosion wear from the time of the flow: θ is the angle of inclination of the tangent to the curve at the point $t = 0$

За цим графіком (рис. 4) можна визначити значення γ_{\max} , а також $\left. \frac{d\gamma}{dt} \right|_{t=0}$, графічно диференціюючи криву у відповідній точці

$$\left. \frac{d\gamma}{dt} \right|_{t=0} = \operatorname{tg}\theta.$$

Отже, в цьому випадку параметр ерозійного зносу визначають на основі експериментальних даних за формулою (19):

$$\alpha = \frac{1}{3} \left[(1 - \gamma_{\max})^{-\frac{1}{3}} - 1 \right]^{-1} \cdot \operatorname{tg}\theta.$$

Враховуючи (18) і (19), знаходимо за рівнянням (7) для кожної конкретної системи робоча рідина-клапанне ущільнення значення коефіцієнта зносу ущільнювальних елементів k стабілізацією витрат робочого середовища через клапанне ущільнення. Це дає можливість за формулою (3) визначити швидкість зношування ущільнювальних елементів, а отже, сумарний об'єм зношування (4) протягом визначеного часу роботи ущільнення.

Висновки. Запропоновано алгоритм визначення швидкості зношування елементів системи клапан-сідло на основі розрахунку значення коефіцієнта зносу елементів конкретної трубопровідної арматури, що дає можливість визначити сумарний об'єм зношування протягом визначеного часу роботи.

Розроблено методика експериментального дослідження параметрів ерозійного процесу підтримуванням постійного перепаду тисків між входом і виходом клапанного ущільнення, а також підтримуванням постійних витрат робочого середовища через клапанне ущільнення.

За розробленою методикою і математичними моделями можна визначити швидкість гідроерозійного зношування ущільнювальних поверхонь елементів трубопровідної арматури залежно від параметрів потоку рідини і конструктивних параметрів перепускної системи.

1. Чегодаев Д. Е., Мулюкин О. П. Элементы клапанных устройств авиационных агрегатов и их надежность. – М.: Изд-во МАИ, 1994. – 208 с.: ил.
2. Шеремета Р. М., Білоус Б. Д. Аналіз причин виникнення течії через ущільнювальні елементи / Вісник Держ. ун-ту “Львівська політехніка” “Проблеми економії енергії”. – 1999. – № 2. – С. 250–254.
3. Шеремета Р. М., Білоус Б. Д. Принципи раціонального конструювання запірно-регулюючої трубопровідної арматури / Вісник Держ. ун-ту “Львівська політехніка” “Проблеми економії енергії”. – Львів: Вид-во Нац. ун-ту “Львівська політехніка”, 2003. – 360 с.
4. Огар П. М., Горохов Д. Б., Шеремета Р. Н. Облитерация стыков уплотнительных соединений // Системы. Методы. Технологии / Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования “Братский государственный университет”. – 2015. – №2. – С. 16–23.
5. http://files.lib.sfu-kras.ru/ebibl/umkd/u_course/Lec/Part2/Glava6/6.10.htm
6. Никитин Г. А. Щелевые и лабиринтные уплотнения гидроагрегатов. – М.: Машиностроение, 1982. – 135 с., ил.
7. Шеремета Р. Н., Долотов А. М., Огар П. М., Пушкарский Я. А. Рациональное конструирование затворов трубопроводной арматуры // Тез. докл. зональной н/т конф. “Пути совершенствования конструкций элементов трубопроводной арматуры”. – Пенза, 1988. – С. 75–76.
8. Шеремета Р. М. До питання оптимального профілювання металополімерних ущільнюючих елементів // Вісник Держ. ун-ту “Львівська політехніка” “Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль в машинобудуванні і приладобудуванні”. – 1999. – № 359. – С. 67–70.
9. <http://science.lpnu.ua/jeccs/all-volumes-and-issues/volume-4-number-2-2018/determination-hydro-erosion-wear-coefficient>.

Z. A. Stotsko, R. M. Sheremeta
Lviv Polytechnic National University

MODELING OF THE PROCESS OF EROSION WEAROUT OF ELEMENTS OF VALVE SEALS

Ó Stotsko Z. A., Sheremeta R. M., 2018

Aim. Study of the kinetics of erosive destruction of valve seal elements during the flow of working media with high energy parameters. **Method.** The object of research is the locking and regulating elements of the valve seal, namely the valve and seat. The model of hydro-erosion wear of the destruction of these elements was constructed. This describes a complex of structural parameters of shut-off knots, as well as parameters that reflect the physical properties of the working medium and the material of the valve-seat pair. The π -similarity theorem and the dimension analysis method are used to construct a model of the wear process of valve element structural elements. To determine the unknown parameters of the model, experimental investigation of the erosion process is proposed to be carried out in two ways: for maintaining the constant pressure drop across the valve seal; for maintaining constant working environment through valve seals. **Results.** The expression of wear is proposed, provided the same hardness of the valve and seat materials. Dependence of the rate of erosive fracture on a set of parameters is determined. An expression is obtained, which determines the change in the depth of erosion wear of sealing surfaces in time. The value of the maximum possible depth of erosion wear of valvure pair elements is substantiated. The coefficients of relative growth of costs, relative pressure change on the consolidation, which are connected with the wear of surfaces of the sealing elements of the valve-seat system are presented. **Scientific novelty.** For the first time, the coefficients of hydro-erosive wear of valve seal components are presented, which are characterized by a relative increase in costs and a relative pressure change on the seal. **Practical significance.** The algorithm of determining the speed of wear of elements of valve seal on the basis of calculation of the value of the coefficient of hydro-erosive fracture of elements of concrete pipeline armature is proposed, which makes it possible to determine the total amount of wear during a certain operating time.

Key words: valve seals, valve seat, erosion, π -similarity theorem, wear rate, wear depth.

1. Chegodayev D. E., Mulyukin O. P. Elementy klapannykh ustroystv aviatsionnykh agregatov i ikh nadezhnost. – М.: Изд-во МАИ, 1994. – 208 с.: ил.

2. Sheremeta R. M., Bilous B. D. Analiz prychnyn vynyknennia techi cherez ushchilniivalni elementy. Visnyk DULP "Problemy ekonomii enerhii", # 2, 1999.
3. Sheremeta R. M., Bilous B. D. Pryntsypy ratsionalnoho konstruiuvannia zapirno-rehuliuuchoi truboprovodnoi armatury. Problemy ekonomii enerhii. Lviv: Vydavnytstvo Natsionalnoho universytetu "Lvivska politekhnik", 2003. – 360 s.
4. P. M. Ogar, D. B. Gorokhov, R. N. Sheremeta. Obliteratsiya stykov uplotnitelnykh soyedineniy. Zhurnal: Sistemy. Metody. Tekhnologii. 2015. No. 2. Federalnoye gosudarstvennoye byudzhethnoye obrazovatelnoye uchrezhdeniye vysshego professionalnogo obrazovaniya "Bratskiy gosudarstvennyy universitet". – 16–23 s.
5. http://files.lib.sfu-kras.ru/ebibl/umkd/u_course/Lec/Part2/Glava6/6.10.htm
6. Nikitin G. A. Shchelevyye i labirintnyye uplotneniya gidroagregatov. – M.: Mashinostroyeniye. 1982. – 135 s. il.
7. Sheremeta R. N., Dolotov A. M., Ogar P. M., Pushkarskiy Ya. A. Ratsionalnoye konstruirovaniye zatvorov truboprovodnoy armatury // Tez. dokl. zonalnoy n/t konf. "Puti sovershenstvovaniya konstruktsiy elementov truboprovodnoy armatury". – Penza, 1988. – S. 75–76
8. Sheremeta R. M. Do pytannia optymalnoho profiliuvannia metalopolimernykh ushchilniuiuchykh elementiv // Visnyk Derzhavnoho universytetu "Lvivska politekhnik". Optyimizatsiia vyrobnychykh protsesiv i tekhnichniy kontrol v mashynobuduvanni i pryladobuduvanni. – 1999. – # 359. – S. 67–70.
9. <http://science.lpnu.ua/jeccs/all-volumes-and-issues/volume-4-number-2-2018/determination-hydro-erosion-wear-coefficient>