

У виробничих умовах були спроби установлення сферичної опори в нижній частині насоса, але не відбувався контроль положення втулки підшипника та ротора. Тому під час запуску насоса втулка не приймала свого необхідного положення.

#### Список посилань

1. Кондусь В. Ю. Лопатеві насоси: навчальний посібник [Текст] / Кондусь В. Ю., Котенко О. І. – Суми: Сумський державний університет, 2021. – 293 с.
2. Марцинковский В.А. Насосы атомных электростанций [Текст] / Марцинковский В.А., Ворона П.М. – М: Энергоатомиздат, 1987. – 256 с.

УДК 539.3

**Бабенко А.Є., докт. техн. наук, професор,  
Боронко О.О., докт. техн. наук, професор,  
Трубачев С.І., канд. техн. наук, доцент,  
Лавренко Я.І., канд. техн. наук, доцент**

Національний технічний університет України «КПІ ім. І.Сікорського», [strubachev@i.ua](mailto:strubachev@i.ua)

### ОГЛЯД ТЕХНІЧНИХ ТЕОРІЙ ВНУТРІШНЬОГО ТЕРТЯ

Врахування внутрішнього тертя має велике значення в інженерній практиці. Завдяки ньому відбувається згасання вільних коливань, обмеження амплітуд резонансних коливань, зниження напружень при ударних навантаженнях, перерозподіл напружень у місцях концентрації їх. Тому питанню дослідження внутрішнього тертя в твердих тілах приділяється велика увага [1].

Відношення роботи сили тертя (необоротно поглиненої енергії)  $\Delta W$  за один цикл деформування до потенціальної енергії  $W$  відповідної амплітуді деформації за той же цикл, характеризується коефіцієнтом поглинання  $\psi$  (питомим розсіюванням енергії):

$$\psi = \frac{\Delta W}{W}. \quad (1)$$

На практиці для вимірювання різних ефектів внутрішнього тертя застосовують і інші характеристики: логарифмічний декремент коливань  $\delta$ , добротність системи  $Q$ , затухання  $\gamma$  (коефіцієнт внутрішнього тертя)

$$\psi = 2\delta = \frac{2\pi}{Q} = 2\pi\gamma. \quad (2)$$

Ці характеристики зберігають свою силу для будь-якого виду напруженого стану. Хоча експериментальним вивченням внутрішнього тертя почали займатися давно (1784 р.), перша гіпотеза була висловлена значно пізніше (в 1865 р.) англійським фізиком Кельвіном.

Кельвін (Томсон) пояснював внутрішнє тертя в твердих тілах їх в'язкістю. На підставі цієї гіпотези в 1890-1892 рр. В. Фойгт запропонував наступну залежність між нормальним напруженням  $\sigma_{11}$  і відносною деформацією  $\varepsilon_{11}$ :

$$\sigma_{11} = E\varepsilon_{11} + \gamma E \dot{\varepsilon}_{11}, \quad (3)$$

де  $E$  – модуль Юнга,

$\gamma$  – коефіцієнт в'язкого внутрішнього тертя,

$\dot{\varepsilon}_{11}$  – швидкість деформації.

З тих пір гіпотеза Кельвіна-Фойгта отримала широке поширення в прикладній теорії коливань з огляду на її простоту (лінійний вид). Невідповідність гіпотези Кельвіна-Фойгта експерименту змусило вчених уточнювати теорію внутрішнього тертя. Так, у 1932 р. Бок, а

в 1935р. Шліппе внесли поправку, запропонувавши вважати коефіцієнт внутрішнього тертя обернено-пропорційним частоті коливань  $\omega$ . Поправка Бока-Шліппе усунула вплив частоти на коефіцієнт поглинання, проте не ввела вплив амплітуди деформації, що експериментально спостерігається. У зв'язку з цим гіпотезу Кельвіна-Фойгта пізніше намагалися різним чином підправити інші автори. Зокрема, Лунц Є.Б., Гловнін Г.Я.

До 1938 р. оформилася друга концепція внутрішнього тертя в твердих тілах. Найбільш чітко сформулював і обґрунтував гіпотезу М.М. Давиденків, вказавши межі застосовності її.

Вперше застосував нелінійну гіпотезу в інженерній практиці Г.С. Писаренко, вирішивши за допомогою асимптотичних методів основні задачі на вібрації з урахуванням нелінійного внутрішнього тертя і запропонував нові рівняння контуру петлі гістерезису для симетричного і несиметричного циклів.

Виникнення нового погляду на явище внутрішнього тертя послужило поштовхом для розвитку експериментальних і теоретичних досліджень, а також створення методів розрахунку коливань з врахуванням нелінійного тертя.

Всі лінійні залежності дають коефіцієнт поглинання, не залежний ні від частоти циклу (що за певних умов узгоджується з експериментом), ні від амплітуди деформацій (що справедливо лише для дерева, залізобетону, цегли, скла, гуми), у металів же коефіцієнт поглинання істотно залежить від амплітуди деформацій (напружень), внаслідок чого лінійні теорії для них не придатні. У технічну літературу увійшли і нелінійні варіанти другої гіпотези [2]:

$$\sigma_{11} = E\varepsilon_{11} \pm \gamma E\varepsilon_{11}^n, \quad (\text{Леонов М.Я., Беспалько С.А., 1955 р.}) \quad (4)$$

$$\sigma_{11} = E\varepsilon_{11} \pm \lambda \gamma f\left(\frac{\varepsilon_{11}}{\varepsilon_{11}^*}\right) \varepsilon_{11}^{*n}, \quad (\text{Хільчевський В.В., 1969 р.}) \quad (5)$$

де  $\lambda$  – поправочний коефіцієнт, за допомогою якого враховується вплив різних чинників на величину внутрішнього тертя).

$$\overline{\overline{\sigma}}_{11} = E \left[ \varepsilon_{11} \pm \alpha \left( \varepsilon_2^* - \varepsilon_{11} - \frac{\varepsilon_{11}^2}{\varepsilon_2^*} \right) \right], \quad (\text{Писаренко Г.С., 1971 р.}) \quad (6)$$

$$\overline{\sigma}_{11} = E \left\{ \varepsilon_{11} - \alpha \left[ \varepsilon_{11} - \varepsilon_2^* + \frac{(\varepsilon_{11} - \varepsilon_0^*)^2}{\varepsilon_2^* - \varepsilon_0^*} \right] \right\},$$

$$\overline{\sigma}_{11} = E \left\{ \varepsilon_{11} - \alpha \left[ \varepsilon_{11} - \varepsilon_1^* - \frac{(\varepsilon_{11} - \varepsilon_0^*)^2}{\varepsilon_2^* - \varepsilon_0^*} \right] \right\}, \quad (\text{Писаренко Г.С., 1972 р.}) \quad (7)$$

$$\text{де } \alpha = \frac{3}{8} \delta, \varepsilon_2^*, \varepsilon_1^* \quad \varepsilon_0^* = \frac{\varepsilon_1^* + \varepsilon_2^*}{2}. \quad (8)$$

Слід підкреслити, що не зважаючи на достатню кількість технічних теорій внутрішнього тертя, розвиток існуючих теорій та розробка нових є актуальною задачею для сучасного машинобудування.

#### Список посилань

1. Бабенко А.Є Коливання неконсервативних механічних систем: Монографія / А.Є. Бабенко, О.О. Боронко, Я.І. Лавренко, С.І. Трубочев. – Нац.техн.ун-т України «КПІ імені Ігоря Сікорського». – Київ: А, 2020. – 153 с. [Електронний ресурс]. Режим доступа: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/38187>

2. Василенко М.В. Теорія коливань і стійкості руху[Текст]: Підручник. / Василенко М.В., Алексейчук О.М. – К.: Вища школа, 2004. – 525 с.