

# Енергетичний аналіз процесів переносу та їх основні характеристики у термомеханічних системах демпфірування

І.В. Ночніченко<sup>1</sup> • О.М. Яхно<sup>1</sup>

Received: 23 September 2021 / Accepted: 24 November 2021

**Анотація.** В статті розглянуто аналіз процесів переносу з позиції балансу енергії в системі демпфірування. Наведені основні теоретичні засади, які базуються на рівняннях енергетичного балансу гідравлічного амортизатору і законі збереження енергії. Запропонований підхід пов'язаний з розробкою методики і схеми розрахунку технічної системи гасіння коливань. Представлені схеми взаємодії системи через явища переносу та функціонування в системі віброзахисту з оточуючим середовищем. Показано, що демпферні системи базуються на фізичному процесі перетворення механічної енергії в теплову, з подальшою дисипацією в навколишнє середовище. Повне розподілення енергії у задачах демпфування приймає наступний вигляд: механічна енергія руху поглинається за рахунок гідравлічного опору рідини та перетворюється у дисипативну складову, яка може сягати 80 % від повної енергії в системі. Наведена математична модель закону збереження енергії. Проведено аналіз, яким чином можливо конструювати робочі процеси в амортизаторі, наприклад, за рахунок дисипації енергії і критеріїв подібності: Ейлера, Фруда, Рейнольдса та ін. В результаті фізичних експериментів встановлено, що рух рідини у гідравлічних каліброваних дроселях породжує виникнення кавітації і різних фізичних явищ та супроводжуваних процесів, при якій відбувається суттєва зміна енергетичного балансу та дисипації енергії при не стаціонарних режимах руху рідини. Наведена залежність загальної втрати потужності амортизатора в змінних умовах експлуатації і схема фізичних процесів та енергетичних перетворень в задачах демпфірування, які перебувають у дисипативних процесах. В статті наведено принципи, які можуть бути використані для проектування апаратів та модулів демпферних систем широкого класу з можливістю рекуперації енергії та накопичення за рахунок введення в систему демпфера, наприклад, мотор-генератора, котушки індуктивності з постійними магнітами, або п'єзоелемент в конструкцію традиційного телескопічного амортизатора.

**Ключові слова:** явище переносу; енергетичний баланс; в'язкість; температура; тепловий потік; демпфер; регенеративні пристрої; дисипація енергії; дисипативна функція; критерії подібності.

## Вступ

При дослідженнях гідромеханічних процесів у різних галузях промисловості виникає необхідність аналізу системи, що тісно пов'язані з явищем переносу маси, тепла, імпульсу [1, 3]. Явище переносу знаходить своє місце в машинобудуванні, хімічній промисловості, систем гідро пневмоавтоматики, біомеханіці та комп'ютерному віртуальному переносу у промисловості 4.0 та 5.0.

Значний внесок у дослідження питань пов'язаних з явищем переносу зробили наступні вчені: Кутателадзе С., Петухов Б. Лайтфут Е., Повх І., Берд Р., Левіч В., Ландау Л., у розвиток теорії віброзахисту Дербаремдікер А., Певзнер Я., Райпель Й., задачі енергетичного переносу Сєдов Л., Шорін С та ін. [1–17].

Як відомо механізм переносу маси, теплоти, імпульсу, забезпечується рухом молекул за рахунок зіштовхування та наявності у середовищі градієнтів: температури, концентрації, в'язкості та ін. На молекулярному рівні розглядають шлях, середньої відстані вільного пробігу матеріального носія, який проходить частинка між зіштовхуванням.

В основу фізико-хімічних процесів переносу покладено фундаментальні рівняння, що характеризуються коефіцієнтами: дифузії, теплопровідності, в'язкості та ін. Дані величини розмірні та характеризуються фізико-хімічними процесами. Таким чином,

✉ І.В. Ночніченко  
igornoch@gmail.com

<sup>1</sup> КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, Україна

процеси переносу є гарним інструментом для вирішення задач демпфірування, що пов'язане з зусиллям опору та законами гасіння коливань: регресивним, прогресивним, лінійним, комбінованим та ін. Наприклад, зміною у заданих межах коефіцієнтів переносу можливо забезпечити необхідну глибину корегування в системі демпфірування, що характеризується перетворенням енергії. Тепловий нагрів робочої рідини пов'язаний безпосередньо з дисипативними процесами і по суті є втратами потужності амортизатору. З цього слідує, що завдяки робочій рідині відбуваються процеси переносу різних субстанцій, таких як: енергія, маса, імпульс, кількість руху, тепло і т. п. У таких задачах змінними можуть бути і носії енергії, їх швидкість і властивості, що визначається довжиною вільного пробігу. Все це спонукає до необхідності проводити поглиблений аналіз структури робочої рідини, в'язкості, молекулярної будови, орієнтації та ін.

Останнім часом в якості робочого середовища застосовують нові енергетичні носії-репульсивні клатрати представлені в роботах Ерошенко В.А., ці речовини відкривають нові можливості при дисипації, акумулюванні і перетворенні енергії в термомеханічних системах. Особливо при вирішенні задач пов'язаних з фізико-хімічними процесами гідромеханіки.

### Постановка задачі

Існує цілий ряд механічних процесів де виникають незворотні перетворення енергії з подальшою її дисипацією, до яких перш за все відносяться - демпферні пристрої, що забезпечують регламентовані процеси часу при згасаючих та вимушених коливаннях в технологічних процесах віброзахисту. При вирішенні подібного роду задач застосовують інтегральний, диференціальний і енергетичний метод пов'язаний з переносом енергії, які базуються на рівняннях балансу енергії.

Функціональний діапазон гасіння енергії системи та ефективність використання, залежить, як від конструктивних особливостей елементів механічної системи, наприклад амортизатор, так і від технічної характеристики складових її елементів.

### Мета роботи

Дослідження явища переносу та робочих процесів в амортизаторі з позиції переносу енергії.

Задачі:

- встановити зв'язок фізичних процесів та енергетичних перетворень у задачах демпфірування.
- визначити явища переносу в амортизаторі у відповідності до критеріїв подібності та балансу енергії.
- отримати залежність загальної втрати потужності в амортизаторі від температури робочої рідини.

На першому кроці, розглянемо задачі перетворення енергії в системах пов'язаних з гасінням коливань. Досліджувались енергоємність амортизатору від його часу роботи, результати представлені на рис. 1. Встановлено, що зміни носять не лінійний характер. В роботі розглядався амортизатор легкої групи при цьому максимальна потужність дисипативних процесів складала біля 80%. Наведена залежність є основною при визначенні надійності та довговічності роботи амортизатору. Енергоємність амортизатора зменшується за рахунок нагріву рідини, що призводить до зниження в'язкості, що в свою чергу змінює витрату крізь дроселі у демпфері та безпосередньо впливає на зусилля його опору.

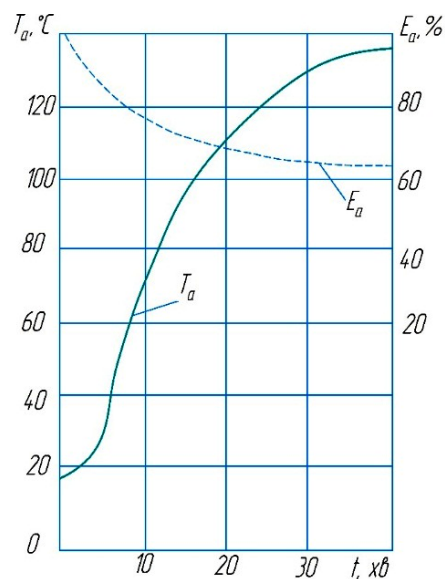


Рис. 1. Зміна енергоємності амортизатору в процесі роботи (частота коливань штоку –  $\omega_1 = 1.67$  Гц,  $A_1 = \pm 0.05$  м) [2]

Таким чином, підтверджуються уявлення про характеристику амортизатора, що дозволяє проводити оцінку якості роботи в дисипативних процесах.

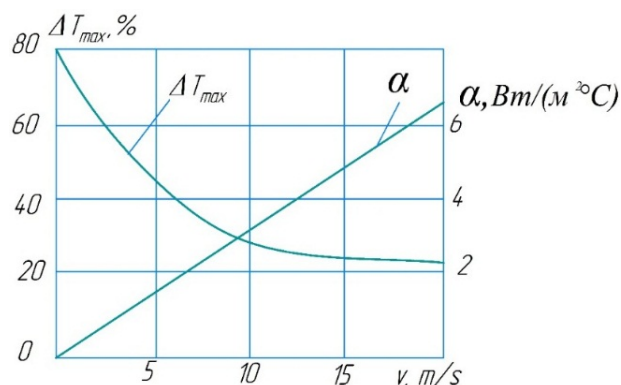
В основі робочої характеристики амортизатора у відповідності до критеріїв, які представлені коефіцієнтами переносу виникає задача визначення енергії, що поглинається та розсіюється амортизатором. З цією метою, спочатку необхідно розглянути конструктивні особливості і складову будову у відповідності з величиною питомої енергоємності амортизатору [2]:

$$E = \frac{\left( \frac{\Delta A}{\Delta t} \right)_{\max}}{\left( \frac{(v \cdot s \cdot \rho \cdot g)}{\Delta t} \right)_{\min}}; \quad (1)$$

де,  $A$ -робота [Дж],  $t$ -час [с],  $v$ -середня швидкість потоку [м/с],  $g$ -прискорення вільного падіння [м/с<sup>2</sup>],  $\rho$ -густина речовини [кг/м<sup>3</sup>],  $s$ -площа перерізу потоку [м<sup>2</sup>].

Кількість енергії яка поглинається амортизатором перетворюється в тепло, яке передається робочому тілу, тобто рідині. Таким чином, підвищення температури визначається теплоємністю рідини та теплопровідністю стінок робочого циліндру, тобто масою його металевих частин та робочої рідини, що визначається коефіцієнтами теплопередачі.

На тепловий баланс амортизатора впливає процес охолодження амортизатора, за рахунок набігаючого потоку повітря. Пришвидшене зниження температури можна досягти за рахунок мінімального коефіцієнту теплопровідності від амортизатора в повітря та використання амортизаторів меншої розмірності (рис. 2).



**Рис. 2.** Залежність зниження максимальної температури нагріву і збільшення коефіцієнту теплопровідності від швидкості повітря, яка обдувається амортизатором (21 Вт/(м²·°C)) [2]

При дослідженні амортизаторів використовувалась робоча рідина МГП-12, з густиною 917 кг/м³ для 20°C. Проаналізуємо, перетворення енергії у відповідності до кількості роботи, поглиненої амортизатором за мінімальний проміжок часу, і кількість рідин, що пройшла через дросельну систему, за той же проміжок часу. Максимальна теплова напруженість буде в тому випадку, коли інтенсивність поглинання енергії, що визначається кількістю роботи поділено на проміжок часу, виявиться максимальною, а вагова витрата рідини буде найменшою (рис. 2). Таким чином, характеристика амортизатора залежить від властивостей середовища, робочих процесів дроселювання та процесів теплообміну.

Функціональний діапазон гасіння енергії системи і його ефективність використання залежить, як від конструктивних особливостей елементів амортизатору, так і від технічної характеристики його складових елементів системи. Для модернізації систем віброзахисту необхідно розглядати процеси в системі гасіння коливань з позиції переносу енергії в складових гідро елементах амортизаторів [5].

Таким чином, підтверджуються уявлення про характеристику амортизатора, проведений аналіз дав можливість оцінити ключові характеристики.

## Теоретичні основи енергетичного перетворення у задачах термомеханічних систем

Перетворення енергії, як відомо визначається його енергетичним ресурсом, а саме сукупністю: механічної, внутрішньої, поверхневої, хімічної енергій, енергії електростатичного, електромагнітного поля, тощо. Академіком Сєдовим Л. І. сформульовано постулат [15], згідно якого – енергія є основною характеристикою стану будь якого фізичного об'єкту у відповідності до закону збереження енергії [4].

Тобто з постулату слідує, що характеристика для будь-якого фізичного об'єкту беззаперечно є енергія.

Розрізняють для системи проводів потенційну та кінетичну енергію [15]:

Потенційна енергія:

$$E_n = (mg)h; \quad (2)$$

де,  $m$  – маса,  $h$  – висота.

Кінетична енергія:

$$E_k = \frac{m\omega^2}{2}; \quad (3)$$

де,  $\omega$  – швидкість.

Робота рушійної сили:

$$E_d = F \cdot S; \quad (4)$$

Розглянемо повну енергію за цикл в амортизаторі [16]:

$$E = E_k + E_d; \quad (5)$$

де  $E_k$  – кінетична енергія,  $E_n$  – потенціальна енергія.

Сумарна енергія демпфірування за одну годину:

$$E_{ts} = E_k + C_1; \quad (6)$$

$C_1$  – кількість ударів за годину 1/год.

Запропонований підхід пов'язаний з розробкою методики і схемою розрахунку технічної системи в робочих процесах амортизатора. Під внутрішньою енергією рідини розуміється сума внутрішньої кінетичної енергії теплового руху молекул і внутрішньої потенціальної енергії взаємодії між молекулами.

В амортизаторі виникають перетворення енергії на вході та на виході, в місцевих опорах (дроселях) з подальшою дисипацією енергії. Ця енергія забезпечує перехідні процеси, які можна представити постулатами першого початку термодинаміки через рівняння балансу енергії в процесах переносу.

$$E = (E_k + E_d + E_e); \quad (7)$$

де,  $E_e$  – внутрішня енергія.

При певному перепаді тиску середовище демпферних пристроїв може стискатися, і тоді з'являється внутрішня енергія. Це характерно для демпферів, які

працюють при значних тисках. Функція енергії речовини входить у функцію дисипації. Повне розподілення енергії у задачах демпфірування приймає наступний вигляд: механічна енергія руху поглинається за рахунок гідравлічного опору рідини та перетворюється у дисипативну складову (до 80 % енергії витрачається на дисипативні процеси).

$$E_{\text{дис}} = (\mu_k \cdot F_N \cdot d); \quad (8)$$

$\mu_k$  – коефіцієнт тертя,  $F_N$  – сила тертя  $d$  – відстань, на яку діє сила тертя.

Характеристика амортизатора відповідає гідравлічній характеристиці і залежить від перепаду тиску рідини в робочій камері та витрати рідини, яка примусово витісняється через клапанно-дросельний вузол. Тому визначається елементами каліброваних дроселів та реологічними і фізико-хімічними властивостями рідини.

### Трансформація енергії в задачах гасіння коливань та пульсацій

Гасіння коливань при демпфіруванні в розглянутому випадку пов'язане з процесами теплової енергії. Таким чином на основі балансу енергії можна характеризувати задачі демпфування (рис. 3). Розглянемо більш детально характер явища переносу та проаналізуємо вплив коефіцієнту переносу на прикладі гідравлічного амортизатора. Кінетична енергія струменю рідини на виході з системи дроселів становить, зазвичай, основну частину повної енергії, яка еквівалентна перепаду тиску на поршні. Дисипація енергії в межах системи, що дроселюється, залежить від конструкції клапанно-дросельного вузла. В свою чергу, пояснюється втратами на удар при вході в систему, яка дроселюється і втратами на тертя в стінках каналів дросельної

системи, і нарешті, тертя між шарами рідини, обумовлюють нагрівання рідини (рис. 3). В загальному випадку представлені вимоги виконуються з умов подібності, які зводяться до відношення сил інерції, тяжіння, тертя при застосуванні критеріїв подібності Ейлера, Фруда, Рейнольдса. Для теорії подібності потоків достатньо застосувати останні два критерія, так як перепад тиску можливо отримати за рахунок сил інерції, тиску і тертя. Тому критерій Ейлера представимо, як функцію  $Eu=f(Fr;Re;We)$ . Визначення впливу сил інерції та ваги в потоках з повільною течією та малих тисках з невеликою в'язкістю рідини обумовлює зростання значення критерія Фруда ( $Fr$ ). Критерій Вебера характеризує ступінь компенсації енергії за рахунок пульсацій тиску. І навпаки, течія рідини при значних тисках в'язкої рідини зі значним впливом сил внутрішнього тертя характеризуються критерієм Рейнольдса ( $Re$ ). Для течії рідини через тонкі щілини та зазори при невеликих перепадах тисків характерно зростання сил поверхневого натягу, які враховуються критерієм Вебера ( $We$ ). Течія рідини через калібровані отвори дроселів амортизаторів являються за своєю фізичною природою автомодельними і співвідношення критеріїв  $Fr$  і  $We$  з цього слідує, що параметри супротиву практично не залежать від цих чисел, навіть при малих швидкостях.

Дисипативні процеси є ключовими в задачах демпфування, які значно пов'язані з втратами механічної енергії, частина якої з часом перетворюється на гідравлічну енергію руху рідини відповідно до критеріїв  $Eu=f(Fr;Re)$ .

На нашу думку, представлений підхід для перетворення енергії може бути ефективно використаний у робочих процесах демперів, ресиверів та інших гасників енергії.

В багатьох випадках процес переносу може бути описаний відповідними системами рівнянь: маси, теплоти, імпульсу, що характеризують властивості робо-

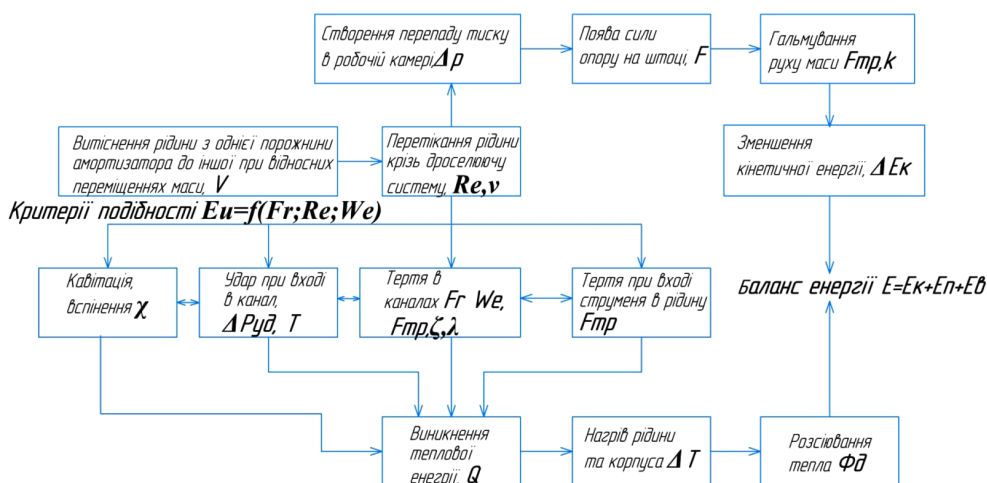


Рис. 3. Зв'язок фізичних процесів та енергетичних перетворень в задачах демпфування

чих рідин, теплопровідності матеріалів елементів, наприклад, пов'язаних з тензором напружень і потоком тепла, рівняння руху, переносу енергії, переносу тепла.

Математична модель, що характеризує даний процес, представлена наступним рівнянням. В дану модель входить так звана дисипативна функція пов'язана з енергетичними характеристиками потоку. В основі – закон збереження енергії [3]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial \tau} \left( \rho u + \frac{1}{2} \rho \omega^2 \right) = & - \left[ \frac{\partial}{\partial x} \omega_x \left( \rho u + \frac{1}{2} \rho \omega^2 \right) + \right. \\ & + \frac{\partial}{\partial y} \omega_y \left( \rho u + \frac{1}{2} \rho \omega^2 \right) + \frac{\partial}{\partial z} \omega_z \left( \rho u + \frac{1}{2} \rho \omega^2 \right) \Big] - \\ & - \left( \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right) + \rho (\omega_x g_x + \omega_y g_y + \omega_z g_z) - \\ & - \left( \frac{\partial}{\partial x} p \omega_x + \frac{\partial}{\partial y} p \omega_y + \frac{\partial}{\partial z} p \omega_z \right) - \left[ \frac{\partial}{\partial x} (\tau_{xx} \omega_x + \tau_{xy} \omega_x + \tau_{xz} \omega_z) + \right. \\ & + \frac{\partial}{\partial y} (\tau_{yx} \omega_x + \tau_{yy} \omega_x + \tau_{yz} \omega_z) + \frac{\partial}{\partial z} (\tau_{zx} \omega_x + \tau_{zy} \omega_x + \tau_{zz} \omega_z) \Big] \end{aligned} \quad (9)$$

де  $\frac{\partial}{\partial \tau}$  – похідна субстанції,  $u$  – внутрішня енергія рідини на одиницю маси,  $\tau$  – в'язкість рідини,  $q$  – густина теплового потоку,  $p$  – сила тиск,  $g$  – сила тяжіння.

Дисипативна функція представляє собою кількість теплоти, яка виникає в потоці в'язкої рідини за рахунок необоротної роботи сил внутрішнього в'язкого тертя, і виражена через градієнти швидкості. В рівняння входять наступні складові члени: з ліва швидкість приросту енергії, з правої частини: швидкість підводу енергії конвективна складова, сили тяжіння, теплопровідність, сили тиску та в'язкість.

В загальному висновку, функція представлена через дисипативні втрати енергії потоку в дросельній системі [3]:

$$\begin{aligned} \Phi_u = & 2 \left[ \left( \frac{\partial \omega_x}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial \omega_y}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial \omega_z}{\partial z} \right)^2 \right] + \left[ \frac{\partial \omega_y}{\partial x} + \frac{\partial \omega_x}{\partial y} \right]^2 + \\ & + \left[ \frac{\partial \omega_z}{\partial y} + \frac{\partial \omega_y}{\partial z} \right]^2 + \left[ \frac{\partial \omega_x}{\partial z} + \frac{\partial \omega_z}{\partial x} \right]^2 - \frac{2}{3} \left[ \frac{\partial \omega_x}{\partial x} + \frac{\partial \omega_y}{\partial y} + \frac{\partial \omega_z}{\partial z} \right]^2; \end{aligned} \quad (10)$$

де  $\omega$  – величина локальної швидкості руху рідини.

Аналізуючи можливості узагальнення рідинних систем на основі теорії розмірностей, керуючий дросельний елемент описується наступним рівнянням:

$$\Delta p, \tau = f(\rho, \mu, \omega, d_{\text{дрос}}); \quad (11)$$

Швидкість згасання у системі маса-пружина-демпфер розраховується:

$$\xi^v = \frac{c}{2\sqrt{mk}}; \quad (12)$$

де  $c$  – коефіцієнт жорсткості,  $k$  – коефіцієнтом в'язкості.

### Застосування енергетичного методу в задачах демпфірування

Перетворення енергії в розглянутій системі вузла віброзахисту автомобіля представлено на рис. 4. Демпфірування досягається за рахунок проходження рідини крізь калібровані канали та дроселі клапанно-дросельного вузла: “стиснення” (суцільна стрілка) та “відбій” (штрихова стрілка). Обидва клапани розташовані в поршні, а циліндр виконує роль корпусу. При поступальному русі механічна енергія перетворюється у гідравлічну з подальшою дисипацією у навколишнє середовище. Гідравлічна енергія трансформується у теплову за рахунок втрати тиску у місцевих опорах елементів схеми (рис. 4) у відповідності до рівняння Бернуллі. Як видно з рис. 4 робочі процеси вузла віброзахисту можна представити через функції переносу, як характеристику перетворень енергій.

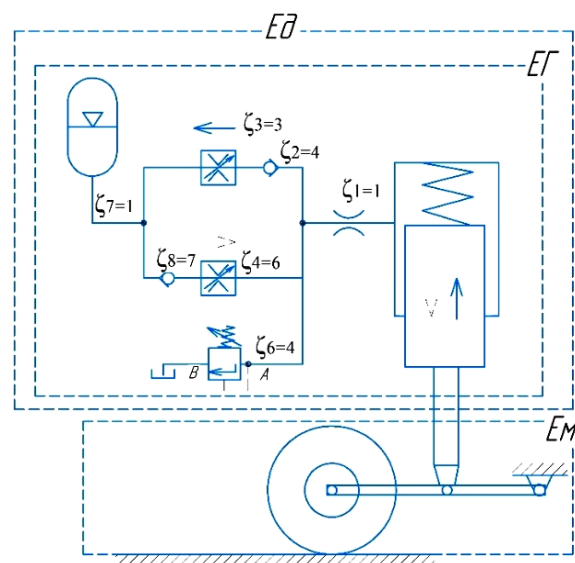


Рис. 4. Конструктивна схема демпферного вузла з класифікацією енергетичних перетворень

Функція переносу кінетичної енергії, пов'язана з законами збереження енергії кількості руху, і визначає робочу характеристику амортизатора, а саме зусилля його опору.

В результаті експерименту, була отримана залежність загальної втрати потужності амортизатора від температури робочої рідини (рис. 5). При зміні температури від +10 °C до +70 °C потужність амортизатора змінилась майже в 2,5 рази для режиму “стиснення”, та в 3,5 рази – для режиму “відбій”, що є не допустимим та не задовольняє існуючі віброзахисні властивості систем у відповідності до випробувань амортизаторів.



З цієї причини, раціонально розглядати систему демпфірування з позиції переносу енергії та її дисипації, що являється функцією температури та в'язкості в реологічному середовищі.

Отримані результати, дозволили визначити математичну залежність загальної втрати потужності амортизатора від температури робочої рідини.

Для режиму “відбою”:

$$N_e = -t \times A_e + B_e ; \quad (13)$$

Для режиму “стиснення”:

$$N_c = -t \times A_c + B_c ; \quad (14)$$

де  $N$  – потужність, що створюється демпфером (зусилля опору);  $t$  – температура робочої рідини,  $A$  – коефіцієнт, що враховує реологічні властивості рідини (чутливість до впливу температури),  $B$  – коефіцієнт зв'язаний з потужністю амортизатором.

Для даних умов для режиму “відбою”  $A_e=3,6$ ,  $B_e=340$ , для режиму “стиснення”  $A_c=110^6$ ,  $B_c=244$ , графічна залежність представлена на рис. 5. З графіку видно, що залежність має степеневу функцію, яка описується поліномом другого порядку.

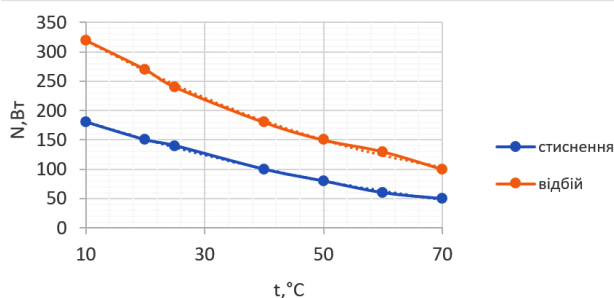


Рис. 5. Залежність загальної втрати потужності амортизатора від температури робочої рідини ( $\omega_1 = 1.67$  Hz,  $A_1 = \pm 0.037$  m)

## Результати та їх обговорення

Запропонований підхід для вирішення даного класу задач, значно спрощує та скорочує процеси фізичного моделювання. Отримані експериментальні данні

у фізичному експерименті дозволили розрахувати числові межі зміни значень коефіцієнтів переносу, і уточнити математичну модель демпфера.

Аналіз результатів показав, що частину втраченої енергії можна накопичити. Середня величина регенерованої енергії становить близько 100 Вт при фактичному збудженні штоку  $0,25 \sim 0,5$  м / с, що відповідає роботі демпфера у середньому діапазоні коливань. Як правило, система демпфування транспортних засобів містить чотири демпфери, таким чином, акумульована енергія може сягати близько 400 Вт. Енергія вібрації включає дві частини: теплову та електричну енергію. Теплова потужність складається з механічної сили тертя, демпфуючої сили зворотного клапана, елементів трубопроводу, що розсіюється, наприклад, у двигуні-генераторі, та внутрішньому опорі.

Підсумовуючи подані результати, відзначимо, що представлений енергетичний підхід є корисним для розв'язку задач віброзахисту.

## Висновки

Таким чином, показано, що енергія являється основною характеристикою стану фізичних об'єктів. В розглянутій статті, представлено підхід для побудови та розгляду систем демпфірування, на прикладі гідравлічного амортизатора з позиції переносу енергії. Завдяки запропонованому підходу охоплюється широка область амплітуд та частот коливань.

Представлене аналітичне пояснення пов'язане з використанням коефіцієнтів переносу для задач демпфірування механічно-гідравлічних систем.

Для підвищення енергетичних показників систем демпфірування доцільно дисипативну складову накопичувати у вигляді енергії або застосувати системи рекуперації, так звані регенеративні пристрої. Запропоновано застосувати рекуперацією енергії, за рахунок введення в систему амортизатора, мотор-генератора або котушки індуктивності з постійними магнітами, п'єзо електричних елементів в конструкцію традиційного телескопічного амортизатора. Даний підхід, можливо застосувати для розробки нових інтелектуальних гідравлічних пристроїв.

## References

- [1] V.G. Levich, *Fiziko-khimicheskaya gidrodinamika*. Izd. 2-e, dopolnennoe i pererabotannoe. Moscow: GIFML, 1959.
- [2] A.D. Derbaremdiker, *Gidravlicheskie amortizatory avtomobilei*, Moscow: Mashinostroenie, 1969.
- [3] R.B. Bird, W.E. Stewart, and E.N. Lightfoot, (August 2001). *Transport Phenomena* (Second ed.). John Wiley & Sons.
- [4] I. Nochnichenko, O. Uzunov, "Characteristics of throttles in hydraulic shock absorber considering temperature changes of fluid", *Mechanics and Advanced Technologies*, No. 2(80), pp. 39–44, 2017. <https://doi.org/10.20535/2521-1943.2017.80.109169>

- [5] I.V. Nochnichenko, *et al.*, Experimental research of hydroluminescence in the cavitating flow of mineral oil, Proc. SPIE 11176, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments, Vol. 1117615 (6 November 2019); (Scopus-ISSN: 2577-5421). <https://doi.org/10.1117/12.2536946>
- [6] I. Nochnichenko, O. Jakhno, I. Liberatskyi, “The character of the transfer phenomenon in the work processes of the hydraulic damper”, in Proc. International scientific conference proceedings “Unitech 2019”, 16–17 November, 2019, Gabrovo, Bulgaria, 2019, pp. 273–277.
- [7] C.G. An, Y. Cao & J. W. Zhang, “Cavitation and noise analysis of throttle hole in double cylinder hydraulic shock absorber”, *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 52(3), pp. 297–304, 2018.
- [8] R. Faraj, J. Holnickiszulc, L. Knap, “Adaptive inertial shock-absorber”, *Smart Materials & Structures*, No. 25(3), 035031, 2016. <https://doi.org/10.1088/0964-1726/25/3/035031>
- [9] Jiang Haobin, Yang LiuQuan, Chen Long, “Simulation and Testing of Damping Characteristics of Hydraulic Shock Absorber for Front Macpherson Suspension”, *Automotive Engineering*, 2007, 11, pp. 970–974.
- [10] Zhao Liang, Wen GuiLin, Han Xu, “An Investigation into the Optimal Control of Vehicle Semi-active Suspension Based on Magnetorheological Damper”, *Automotive Engineering*, Beijing, 2008, 6, pp. 1–6.
- [11] I.V. Nochnichenko, O.M. Yakhno, “Informatsiino-energetichnii pidkhid do virishennya zadach gidrodinamiki ta mekhanotroniki v protsesakh perenosu energii”, *Mechanics and Advanced Technologies*, No. 3 (87), pp. 38–48, 2019. <https://doi.org/10.20535/2521-1943.2020.88.195505>
- [12] O.M. Yakhno, S. Machuga, “Eksergiinii analiz ta metod variatsiinih nerivnostei v deyakikh zadachakh gidromekhaniki”, *Visnik NTUU “KPI”. Seriya mashinobuduvannya*, No.3 (78), pp. 19–25, 2016, DOI:<http://dx.doi.org/10.20535/2305-9001.2016.78.73382>.
- [13] S.N. Shorin, *Teploperedacha*, Moscow: Vysshaya shkola, 1964.
- [14] E. Fermi, *Termodinamika*; M.I. Kaganov, B.A. Vaisman Eds., 2nd ed., Khar'kov: Izdatel'stvo KhGU, 1973.
- [15] L.I. Sedov, “Vidy energii i ikh transformatsii”, *Prikladnaya matematika i mekhanika*, Vol. 6, no. 45. pp. 964–984, 1981.
- [16] Kh. Eksner, R. Freitag, R. Lang, *Gidroprivod osnovy i komponenty Uchebnyi kurs po gidravlike*, Kemp Kh. Ed., Vol. 1., Germany: Izdatel'stvo Bosh Reksrot, 2003.
- [17] I.V. Nochnichenko and O.M. Yakhno, “Zastosuvannya yavishcha perenosu ta informatsiinoi entropii do analizu povedinki magnitnoreologichnogo dempfera”, *Naukovi visti NTUU “KPI”*, No. 4 (120), pp. 54–62, 2018. <https://doi.org/10.20535/1810-0546.2018.4.141241>.

## Energy analysis of transfer processes and their main characteristics in thermo mechanical damping systems

I. Nochnichenko, O. Jakhno

**Abstract.** The article discusses the energy analysis of transfer processes in the damping system. The basic theoretical foundations based on the equations of the energy balance of the hydraulic shock absorber and the law of conservation of energy are presented. The proposed approach is associated with the development of a methodology and scheme for calculating the technical system of vibration damping. The schemes of interaction of the system through the phenomena of transfer and functioning of the vibration protection system with the environment are presented. It is shown that damper systems are based on the physical process of transformation of mechanical energy into thermal energy with subsequent dissipation into the environment. The total energy distribution in damping problems takes the following form the mechanical energy of motion is absorbed due to the hydraulic resistance of the liquid and turns into a dissipative component, which can reach 80% of the total energy. A mathematical model of the law of conservation of energy is presented which includes a dissipative function. The analysis of how it is possible to design work processes in a shock absorber due to energy dissipation and similarity criteria: Euler, Froude, Reynolds, etc. As a result of physical experiments, it was found that the movement of a fluid in hydraulic calibrated throttles gives rise to cavitation and various physical phenomena and accompanying processes, in which there is a significant change in the energy balance and energy dissipation in non-stationary modes of fluid movement. The dependence of the total power loss of the shock absorber under changing operating conditions, and the diagram of physical processes and energy transformations in the problems of damping, which are in dissipative processes, are given. The article describes the principles that can be used for the design of devices and modules of damper systems of a wide class with the possibility of energy recovery and accumulation by introducing a damper into the system, for example, a motor generator, an inductor with permanent magnets or a peso element in the design of a traditional telescopic shock absorber.

**Keywords:** Transfer phenomenon; energy balance; viscosity; temperature; heat flux, damper, regenerative devices, energy dissipation, dissipative function, similarity criteria.

## Энергетический анализ процессов переноса и их основные характеристики в термомеханических системах демпфирования

И.В. Ночниченко, О.М. Яхно

**Аннотация.** В статье рассмотрен энергетический анализ процессов переноса в системе демпфирования. Приведены основные теоретические основы, основанные на уравнениях энергетического баланса гидравлического амортизатора и законе сохранения энергии. Предлагаемый подход связан с разработкой методики и схемы расчета технической системы гашения колебаний. Представлены схемы взаимодействия системы через явления переноса и функционирования системы вибрационной защиты с окружающей средой. Показано, что демпферные системы базируются на физическом процессе превращения механической энергии в тепловую с последующей диссипацией в окружающую среду. Полное распределение энергии в задачах демпфирования принимает следующий вид. механическая энергия движения поглощается за счет гидравлического сопротивления жидкости и превращается в диссипативную составляющую, которая может достигать 80% полной энергии. Приведена математическая модель закона сохранения энергии, в которую входит диссипативная функция. Проведен анализ каким образом можно конструировать рабочие процессы в амортизаторе за счет диссипации энергии и критерии подобия: Эйлера, Фруда, Рейнольдса и т.д. В результате физических экспериментов установлено, что движение жидкости в гидравлических калиброванных дросселях порождает возникновение кавитации и различных физических явлений и сопровождающих процессов, при которой происходит существенное изменение энергетического баланса и диссипация энергии при не стационарных режимах движения жидкости.

Приведена зависимость общей потери мощности амортизатора в изменяющихся условиях эксплуатации, и схема физических процессов и энергетических преобразований в задачах демпфирования, которые находятся в диссипативных процессах. В статье приводятся принципы, которые могут быть использованы для проектирования аппаратов и модулей демпферных систем широкого класса с возможностью рекуперации энергии и накопления за счет ввода в систему демпфера, например, мотор-генератора, катушки индуктивности с постоянными магнитами или пьезо элемента в конструкцию традиционного телескопического амортизатора.

**Ключевые слова:** явление переноса; энергетический баланс; вязкость; температура; тепловой поток, демпфер, регенеративные устройства, диссипация энергии, диссипативная функция, критерии подобия.