

УДК 62-50.001:542.63

## Дисипативні процеси та їх основні характеристики при розгляді механічних систем

**І.В. Ночніченко<sup>1</sup>, к.т.н., доц., О.М. Яхно<sup>2</sup> докт. техн. наук, професор**

1,2-Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна

*Анотація. Термін служби гідравлічних демпферів скорочується в основному внаслідок термічної втоми, що обумовлено постійною вібрацією. В статті розглянуто процес переносу енергії в системі гасіння коливань. Представлені схеми взаємодії системи з позиції переносу та трансформації енергії. Встановлено, що рух рідини у гідравлічних каліброваних дроселях при певних умовах породжує кавітаційні явища, при яких відбувається суттєва зміна енергетичного балансу, яка може становити 80% від повної енергії в системі.*

Ключові слова: демпфер; вібрація; перетворення енергії; дисипація

Одним із головних недоліків рідинних демпферів, є їх залежність робочої характеристика від умов експлуатації [1-6]. Процес розсіювання енергії у рідинних демпферів дуже складний, оскільки ефективність демпфування залежить від різних параметрів, таких як сила функції впливу (тобто амплітуда та частота), розмір і геометрія частинок, тертя між частинками, властивості матеріалу частинки, в'язкість та густина [7-12]. Наприклад при застосуванні феромагнітної рідини у їх складі. Незважаючи на те, що існуючі моделі досить добре прогнозують макроскопічну поведінку демпферів, їхні прогнози стають у деяких випадках не достовірними, як тільки змінюються параметри на рівні частинок (наприклад при розгляді на мікроскопічному рівні). Це має місце, коли робоча рідина демпфера складається з двох чітко різних матеріалів, таких як тверда речовина та рідина, або коли частинки мають складну форму [7-17]. Оскільки ефективність МР залежить від руху довільних частинок відносно одна одної то можливо для їх моделювання застосувати методи лагранжевих частинок, або метод дискретних елементів.

В багатьох випадках враховуючи реологічну складність розглядаючих середовищ, які як відомо в роботі [18] можуть володіти як в'язкими так і пружними властивостями. Для опису реологічно складних систем використовують механічні моделі запропоновані в роботі Рейнера [18]. В основу цих моделей покладені інформації о властивостях аналогій середовища.

Сукупність існуючих реологічних властивостей може бути представлена як дерево, яку складається з ідеальних тіл. З них три тіла представлені в механіці суцільного середовища: тверде тіло закон Гука (H), пластичне тіло Сен-Венана (StV), і ньютонівська рідина (N). Більш реологічно складні тіла можуть бути отримані шляхом відповідних комбінацій цих законів в паралельному або послідовному з'єднанні, що дозволяє описати не тільки видовження та зсув і зустрічне розтягнення. Механічні моделі макро реології ньютонівських та відповідно в'язко-пластичні або бінгамові тіла ньютонівських рідин можуть бути представлені наступним реологічним деревом.

Як видно з даної таблиці реологічні властивості різних середовищ і відповідно і коефіцієнти переносу можуть бути описані не тільки величиною в'язкості але і іншими фізичними константами як модуль пружності, пластичності та ін. Викликає інтерес те, що коефіцієнти переносу  $C_T$ ;  $D_T$ ;  $E_T$  мають однакову одиницю виміру –  $m^2/s$ . До того ж вони є одиницями одного порядку:

$$C_T \approx D_T \approx E_T \quad (1)$$

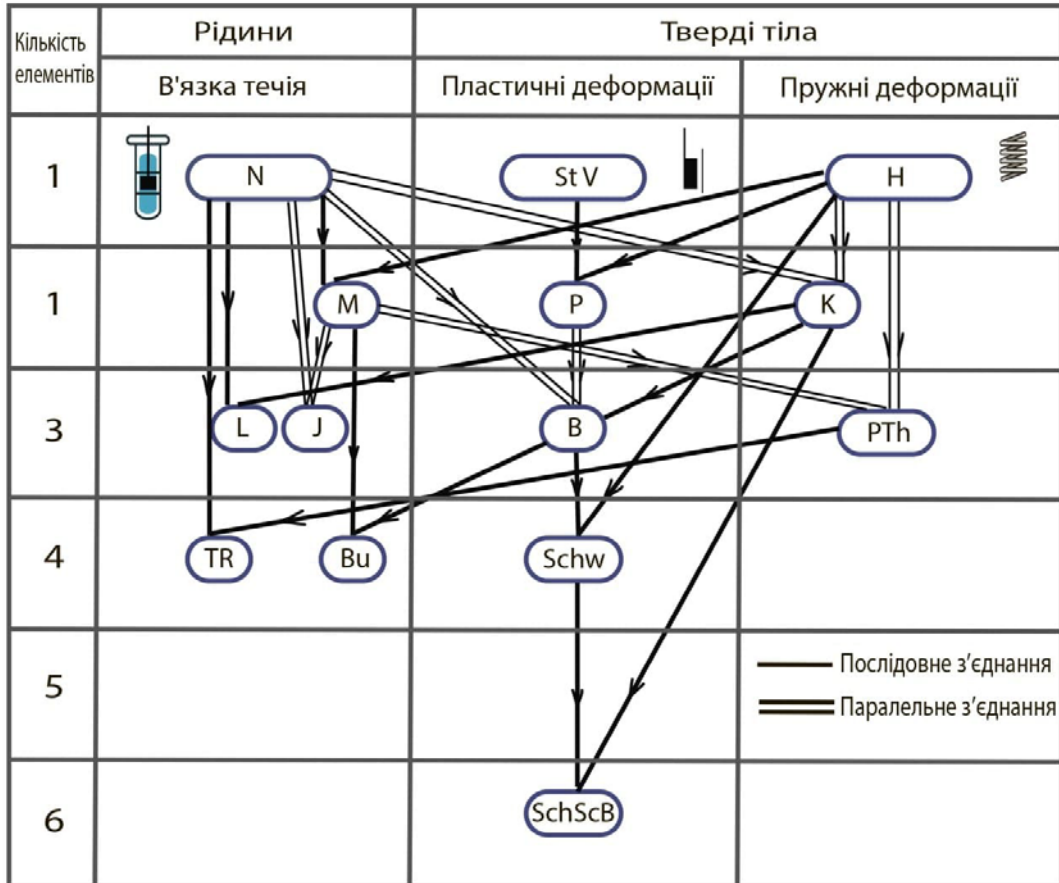
Аналогія переносу кількості руху, маси і теплоти, а також умова (1) вперше були сформульовані Рейнольдсом.

Розділивши коефіцієнт турбулентної в'язкості  $C_T$ , на коефіцієнт турбулентної дифузії  $D_T$  і коефіцієнт турбулентного переносу теплоти  $E_T$ , отримаємо безрозмірні турбулентні числа Шмідта  $Sc$  і Прандтля  $Pr$ .

В таблиці 1 представлено система реологічних тіл, побудованих у відповідності до структури елементів, утворюючих тіло.

Табл.1

Система реологічних тіл, побудованих у відповідності до структури елементів



Аналіз проведений в цій статті, ґрунтується на припущенні, що ефективність демпфування можна покращити шляхом додавання до рідини суміші частинок з пружними властивостями. Гасіння коливальних процесів при демпфуванні в розглянутому випадку безпосередньо пов'язане з процесами теплової енергії. Механізм утворення тепла та розподіл тепла можна пояснити за допомогою дисипативної та теплової моделі. 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  $E_u = f(Fr; Re; We)$ . 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 характеризується 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.

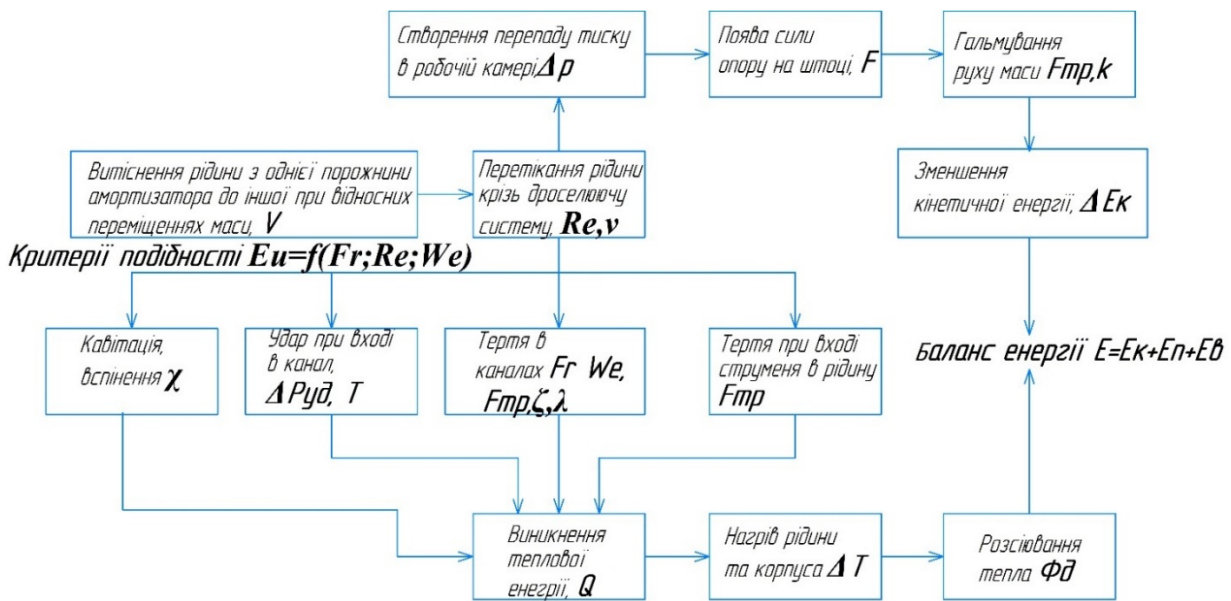


Рис.1. Зв'язок фізичних процесів та енергетичних перетворень в задачах демпфування

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  $E_u=f(Fr; Re)$ .

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

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

$$\frac{\partial}{\partial \tau} \left( \rho u + \frac{1}{2} \rho \omega^2 \right) = - \left[ \frac{\partial}{\partial x} \omega_x \left( \rho u + \frac{1}{2} \rho \omega^2 \right) + \frac{\partial}{\partial y} \omega_y \left( \rho u + \frac{1}{2} \rho \omega^2 \right) + \frac{\partial}{\partial z} \omega_z \left( \rho u + \frac{1}{2} \rho \omega^2 \right) \right] -$$

$$- \left( \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right) + \rho (\omega_x g_x + \omega_y g_y + \omega_z g_z) - \left( \frac{\partial}{\partial x} p \omega_x + \frac{\partial}{\partial y} p \omega_y + \frac{\partial}{\partial z} p \omega_z \right) -$$

$$- \left[ \frac{\partial}{\partial x} (\tau_{xx} \omega_x + \tau_{xy} \omega_x + \tau_{xz} \omega_x) + \frac{\partial}{\partial y} (\tau_{yx} \omega_x + \tau_{yy} \omega_x + \tau_{yz} \omega_x) + \frac{\partial}{\partial z} (\tau_{zx} \omega_x + \tau_{zy} \omega_x + \tau_{zz} \omega_x) \right]$$

де  $\frac{\partial}{\partial \tau}$  - похідна субстанції,  $u$  - внутрішня енергія рідини на одиницю маси,  $\tau$  - сила в'язкості рідини,  $q$  - густина теплового потоку,  $p$  - сила тиск,  $g$  - гравітаційна 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, теплопровідність, гравітаційна складова, сили тиску та в'язкість.

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

$$\Phi_u = 2 \left[ \left( \frac{\partial \omega_x}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial \omega_y}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial \omega_z}{\partial z} \right)^2 \right] + \left[ \frac{\partial \omega_y}{\partial x} + \frac{\partial \omega_x}{\partial y} \right]^2 +$$

$$+ \left[ \frac{\partial \omega_z}{\partial y} + \frac{\partial \omega_y}{\partial z} \right]^2 + \left[ \frac{\partial \omega_x}{\partial z} + \frac{\partial \omega_z}{\partial x} \right]^2 - \frac{2}{3} \left[ \frac{\partial \omega_x}{\partial x} + \frac{\partial \omega_y}{\partial y} + \frac{\partial \omega_z}{\partial z} \right]^2 ;$$

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

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

$$\Delta p, \tau = f(\rho, \mu, \nu, d_{\text{дрос}}); \quad (4)$$

Швидкість згасання у системі маса-пружина-демпфер розраховується:

$$\xi^v = \frac{c}{2\sqrt{mk}}; \quad (5)$$

де  $c$  - коефіцієнт жорсткості,  $k$  - коефіцієнтом в'язкості,  $m$  - маса.

#### 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.

#### Список літератури

1. Кафаров В. В. Основы массопередачи: системы газ - жидкость, пар - жидкость, жидкость – жидкость/ В. В. Кафаров. – М.: Высшая школа, 1979. – 440 с.
2. Левич В. Г. Физико-химическая гидродинамика. — Изд. 2-е, дополненное и переработанное. — М.: ГИФМЛ, 1959. — 700 с.
3. Дербаремдикер А.Д. Гидравлические амортизаторы автомобилей. М.: Машиностроение, 1969. — 236 с.
4. Bird, R.B., Stewart, W.E. and Lightfoot, E.N. (August 2001). Transport Phenomena (Second ed.). John Wiley & Sons.
5. I. Nochnichenko and O. Uzunov, “Characteristics of throttles in hydraulic shock absorber considering temperature changes of fluid”, Mech. Adv. Technol., vol. 2, no. 80, pp. 39—44, 2017. doi: 10.20535/2521-1943.2017.80.109169.
6. I. Nochnichenko, O. Jakhno, I. Liberatskyi (2019) The character of the transfer phenomenon in the work processes of the hydraulic damper // International scientific conference proceedings «Unitech 2019», 16-17 November, 2019. – Gabrovo, Bulgaria,. – P. 273 – 277.
7. An, C. G., Cao, Y., & Zhang, J. W. (2018). Cavitation and noise analysis of throttle hole in double cylinder hydraulic shock absorber. Journal of Shanghai Jiaotong University, 52(3), 297–304.
8. Faraj, R., Holnickiszulc, J., & Knap, L. (2016). Adaptive inertial shock-absorber. Smart Materials & Structures, 25(3), 035031. doi: 10.1088/0964-1726/25/3/035031.
9. Jiang Naobin, 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. Ночніченко І.В., Яхно О.М. Інформаційно-енергетичний підхід до вирішення задач гідродинаміки та механотроніки в процесах переносу енергії/ Mechanics and Advanced Technologies #3 (87), 2019. – стр.38-48. doi: 10.20535/2521-1943.2020.88.195505.
12. Яхно, О. М. Ексергійний аналіз та метод варіаційних нерівностей в деяких задачах гідромеханіки / О.М. Яхно, О. С.Мачуга // Вісник НТУУ «КПІ». Серія машинобудування. 2016.- №3 (78), – С. 19 – 25, DOI:http://dx.doi.org/10.20535/2305-9001.2016.78.73382.
13. Шорин С . Н . Теплопередача . - М . : Высшая школа, 1964 . - 490 с.
14. Ферми, Энрико. Термодинамика = Thermodynamics : пер. с англ. / Энрико Ферми ; Отв.ред., предисл. Моисей Исаакович Каганов ; Пер. Б.А. Вайсман . – 2-е изд., стер . – Харьков : Издательство ХГУ, 1973 . – 136 с.
15. Седов, Л. И. Виды энергии и их трансформации / Л. И. Седов // Прикладная математика и механика. - 1981. - Вып. 6, т. 45. - С. 964 – 984.
16. Х. Экнер, Р. Фрейтаг, Р. Ланг Гидропривод основы и компоненты Учебный курс по гидравлике, Кемп Х.(редактор) том 1. –Германия : Издательство Бош Рексрот, 2003 . – 322 с.

17. Ночніченко І.В., Яхно О.М. Застосування явища переносу та інформаційної ентропії до аналізу поведінки магнітореологічного демпфера / Наукові вісті НТУУ «КПІ»: науково-технічний журнал № 4 (120) 2018. – стр.54-62. doi: 10.20535/1810-0546.2018.4.141241.
18. Рейнер М. Реология. М.: Наука, 1965. – 224 с.

## **Dissipative processes and their main characteristics when considering mechanical systems**

**Ihor Nochnichenko<sup>1</sup>, PhD. Techn. Sc., Ass. Prof., Oleg Jakhno Prof. Dr. Eng.**

1- National technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine

*Abstract. The complex approach for development of systems by processes of transfer and system engineering in problems of hydro aeromechanics and mechatronics is considered. The proposed approach at the stage of system development can significantly improve the performance of the system as a whole and generate new systems. It is shown that the processes of information entropy transfer are decisive in the design of technical systems, namely in the processes of exchange: energy, momentum, mass, charge, angular momentum in the studied systems. It is substantiated that the phenomena of transfer are a useful tool for the analysis of physically heterogeneous systems. Fundamental analysis of all three sub-domains of mass, heat, and momentum is useful for calculating and analyzing many fundamental constants in the gradient representation. In problems of fluid and gas mechanics, transfer analysis is usually used to determine the velocity profile that flows through a rigid volume. Thus, the phenomena of transference cover all physical changes and transformations in technical systems and in the universe as a whole at their mathematical representation. Taking into account the phenomenon of transfer in artificial hybrid systems opens up the "thin threads" of process control together with the levels of consideration of these systems due to the fundamental values that are the "bridges" between macro and micro parameters.*

*Keywords: “Information” damper; vibration; energy conversion; dissipation*