

# Інформаційно-енергетичний підхід до вирішення задач гідродинаміки та механотроніки в процесах переносу енергії

І. В. Ночніченко • О. М. Яхно

КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, Україна

Received: 15 January 2020 / Accepted: 24 February 2020

**Анотація.** В статті розглянуто підхід фізичних аспектів процесів переносу. Під кутом головного постулату термодинаміки - перетворення теплової енергії в механічну роботу і навпаки, було розглянуто енергетичний баланс тарілчастого клапану. Наведено схему взаємодії системи через процес переносу та функціонування і проілюстровано аналогію між тарілчастим гідравлічним клапаном та електричним транзистором. Показано, що теплота являється однією формою енергії, яка може перетворюватись в інші форми. В результаті чисельної та фізичної візуалізації встановлено, що рух рідини у тарілчастому клапані породжує виникнення різних фізичних явищ та супроводжуючих процесів, наприклад кавітації при якій відбувається суттєва зміна енергетичного балансу та дисипація енергії при не стаціонарних режимах руху рідини. В першому наближенні зроблена спроба пов'язати рівняння явища переносу з інформаційним переносом через сигнал та градієнт енергії.

Наведений інформаційно-енергетичний підхід та алгоритм є прийнятним для постановок та розв'язування задач щодо неідеалізованих механічних та гідромеханічних систем, які перебувають у дисипативних процесах. В статті наведено принципи, які можуть бути використані для проектування апаратів та модулів механотронних систем.

**Ключові слова:** явище переносу; інформаційно-енергетичний перенос; в'язкість; температура; тепловий потік; система; синтез; системний інжиніринг; інформаційна ентропія; ентропійний потенціал; кавітація; процес; фотогранометрія; технічна візуалізація, механотроніка.

## Вступ

XXI століття визначено як століття інформатики, яка виступає як наука та технологія [1]. Інформатика, як відомо, ґрунтується на обчислювальній математиці з такими її атрибутами, як алгоритм та програма. Обчислювальна математика потребує для її ефективного використання спеціального інструментарію, насамперед ЕОМ та застосування програм автоматизованого проектування.

Яскравим прикладом використання інформаційних технологій є четверта промислова революція, де масово впроваджуються кіберфізичні системи у виробництво і обслуговування людських потреб.

Під час дослідження механічних та гідродинамічних процесів в різних галузях промисловості виникає необхідність аналізу системи, які тісно пов'язані з явищем переносу [5]. Великий внесок у дослідження процесів переносу зробили такі вітчизняні та зарубіжні вчені, Ламб Г., Байрон Берд Р., Кутателадзе С., Петухов Б. Стьюарт В., Лайтфут Е. та інші. Поглиблені дослідження явища переносу в гідродинаміці представляють собою область науки і техніки яка інтенсивно розвивається [2].

При вирішенні інженерних задач гідродинаміки широко застосовують підхід до розгляду систем під кутом явища переносу. В свою чергу це пов'язано з певними неоднорідностями: густини, температури та швидкості переміщення окремих шарів речовини.

З практичним розвитком теорії процесів переносу в робочому середовищі систем безпосередньо спонукало до застосування в цій області нових математичних методів. Наприклад, методу контрольного об'єму в комп'ютерній гідродинаміці [3], циклічно-модульного підходу для побудови об'єктів мехатроніки [23], енергетичного підходу до аналізу поведінки неідеалізованих механічних та гідромеханічних систем [4].

Потреби розвитку сучасної науки і техніки, а зокрема такої дисципліни як механотроніка породжують необхідність у поглиблених дослідженнях процесів та явищ переносу. В механотронних системах протікання робочих процесів тісно пов'язані з переносом речовини, енергії та інформації. У зв'язку з цим особливого значення набуває потреба у ретельному дослідженні процесів інформаційно-енергетичного переносу. Аналіз інформаційних джерел встановив, що в найближчому майбутньому на ряду з інформаційними технологіями і

біоінженерією революційний вплив на розвиток техносфери матиме наука механотроніка та представляє собою область знань механіки, електроніки, інформатики, автоматики. Наслідком досліджень якої є модернізація існуючих систем та створення нового покоління техніки та технологій [1, 2].

Процесам переносу в системах гідроприводу приділяють значну увагу тому що вони мають яскраво виражений характер-енергетичного балансу, і тісно пов'язані з переносом маси, енергії та імпульсу. Також слід відмітити, що організація ефективних робочих процесів тісно пов'язана з інформаційно-енергетичним переносом, а саме віртуальною складовою частиною комп'ютером, алгоритмом та програмою.

Мехатронний підхід в побудові машин нового покоління, полягає в перенесенні функціонального навантаження від механічних вузлів до інтелектуальних (електронних, комп'ютерних та інформаційних) компонентів. Які легко перепрограмувати під нові завдання і при цьому мають зниженні економічні затрати на розробку системи [2]. Тобто підвищення економічного коефіцієнту ексергії. На нашу думку використання процесів переносу підвищить показники процесів переносу ексергії, як економічної доцільності використання явищ переносу.

Функціональний аналіз виробничих машин показує, що частка механічної частини скоротилася з 70 % на початку 90-х років до 25–30 % в даний час. У наступні десятиліття відбувалося поступове витіснення механічних вузлів – спочатку електронними, а потім і комп'ютерними блоками. В даний час в мехатронних системах обсяг функцій розподілених між механічними, електронними та комп'ютерними компонентами практично зрівнявся. При цьому, частка комп'ютерної частини зросла за останнє десятиріччя вдвічі, і є всі підстави прогнозувати збереження цієї тенденції в техніці майбутнього [2]. В багатьох випадках такі процеси визначаються швидкістю сумарних інформаційно-енергетичних перетворень в системі.

Наприклад, електрокінетичні процеси, які протікають в мехатронних системах з прямим взаємним приростом енергії різних видів: хімічної, механічної, електромагнітної [18–21].

Останнім часом широко застосовують для створення систем підхід системного інжинірингу (SE) [6–11]. У даному напрямку значний внесок зробили наступні вчені: С.І. Qian, L, Джеффри Грейді, Вільям Росс Ешбі, Бородкін О.О. та інші. Системному інжинірингу притаманні наступні пріоритети: набір вимог, функції, які потрібні на це виконання, елементи рішення, оцінка, оптимізація та синтез. В результаті застосування підходу отримують технічне рішення з заданим набором властивостей. Слід зазначити, що системному інжинірингу притаманно рух з низу до гори під час синтезу. При застосуванні підходу системної інженерії також водять поняття – ентропії. Без якої, як показує практика, в деяких випадках не доцільно розглянути складну систему та робочі процеси в ній [12]. Аналізуючи праці відомих вчених К. Шеннона, М. Зільбермана з позиції створення систем з застосуванням системного підходу, для оцінки інформаційного переносу можливо використати системний інжиніринг разом з поняттям інформаційної ентропії [12, 20].

### Постановка задачі

Як відомо фізичний стан тіла визначається його енергетичним ресурсом, а саме сукупністю: механічної, внутрішньої, поверхневої, хімічної енергій, енергії електростатичного, електромагнітного поля, тощо. Академіком Седовим Л. І. сформульовано постулат [16], згідно якого – енергія є основною характеристикою стану будь якого фізичного об'єкту у відповідності до закону збереження енергії [4]. При застосуванні системного інжинірингу та ентропії можливо організувати ефективні робочі процеси в складних технічних системах, за рахунок ефективного використання процесів переносу. З іншого боку, дозволяє створювати адаптивні системи, наприклад, стійких до перешкод зв'язку. Також слід відзначити, що не всі процеси можливо описати та однозначно пояснити, наприклад, гідродинамічну люмінесценцію [18–22]. Для вирішення такого класу задач можна в якості пізнання процесу та контролю застосувати технічну візуалізацію або фотограметрію разом з експертною програмою з комп'ютерною частиною.

Дослідження механічних процесів в системах гідропневмоприводів і вивчення процесів руху робочого середовища має важливе теоретичне та прикладне значення [1–4]. Гідропневмопривод є специфічним класом механічної системи із рідинним або газовим робочим середовищем, яке має особливі властивості. Особливість таких систем полягає у виникненні під час роботи приводу: спінення, кавітації, пульсації тисків, зміни в'язкості, температури, густини, стисливості рідини та повітря. До прикладу, в деяких випадках це призводить до нестабільної роботи системи, виникнення автоколивань, що впливає на функціональну характеристику та точності позиціонування приводу, тощо [4]. В результаті врахування явища переносу можливо покращити та створити нові інтелектуальні конструкції схожі за своєю структурою та функціями на біонічні або біомехатронні системи [2].

Враховуючи дані попередніх досліджень з яких слідує, що актуальною науково-технічною задачею є застосування підходу явища переносу в остаточному розв'язку задач при створенні систем. Застосування енергетичного підходу до аналізу поведінки багатокомпонентних матеріальних об'єктів, зокрема реальних механічних та гідромеханічних систем, дозволить формулювати та будувати розв'язки нових класів задач, пов'язаних із аналізом нелінійності механічних процесів, виявляти важливі з огляду, зокрема на екологічну проблематику та енергозбереження. Є два принципово різних підходи при побудові та дослідженні системи. Ми

використали підхід явища переносу та системного інжинірингу під кутом енергетичного балансу системи і переносу інформації. На нашу думку, раціонально застосовувати підхід явища переносу разом з постулатом термодинаміки, ентропією та переносом інформації, саме через енергетичні зв'язки протікаючих процесів.

**Метою** є зменшення часу та скорочення економічних витрат на проведення фізичного експерименту.  
**Задачі:**

- отримати математичну залежність інформаційно-енергетичного переносу;
- розробити підхід який базується на алгоритмі і розрахунку конструкції з застосуванням інформаційно-енергетичного переносу.

### Основні положення для формування підходу

Характеристика для будь-якого фізичного об'єкту беззаперечно є енергія. Якщо мехатронна система здібна виконувати роботу, вона має “запасаючу роботу”. Цей тип “запасаючої роботи” відомий як енергія. Слід відмітити, що робота та енергія мають одну й туж саму розмірність. В залежності від типу “запасаючу роботу” розрізняють для системи проводу як [17]:

- потенційну енергію (енергія положення):

$$E_n = (mg)h,$$

де,  $m$  – маса,  $h$  – висота.

- кінетичну енергію (енергія руху):

$$E_k = \frac{mv^2}{2},$$

де,  $m$  – маса,  $v$  – швидкість.

Відповідно до різних форм руху матерії, розрізняють кілька типів енергії: механічна, електромагнітна, хімічна, ядерна, теплова, гравітаційна та ін. Крім того, розрізняють енергію внутрішню і енергію у полі зовнішніх сил [16]. У випадку неперервного середовища вводять поняття густини енергії – енергія в одиниці об'єму, інформаційної насиченості і густини потоку енергії, що дорівнює добутку густини енергії на швидкість її переміщення.

Енергію в різних галузях можна записати наступними математичними виразами [16]:

У механіці – сума потенціальної та кінетичної енергії.

$$E = E_k + E_n,$$

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

Відповідно до першого початку термодинаміки – внутрішня енергія або збільшення термодинамічної енергії, є сумою теплоти та роботи наданих системі.

$$U = Q + A,$$

де  $Q$  – кількість теплоти, передане системі,  $A$  – робота яку здійснює система.

Через зміну внутрішньої енергії можна судити про систему. Зміну енергії можна реалізувати двома шляхами: через зміну роботи теплопередачі та зміну внутрішньої енергії без роботи.

Внутрішня енергія системи:

$$U = Uf(T, V),$$

Таким чином зміну енергії представити можна через теплову роботу та інформацію.

### Формування підходу інформаційно-енергетичного переносу для вирішення задач гідродинаміки та механотроніки

Для досягнення мети в перше пропонується використовувати синтез інформаційно-енергетичного переносу сигналу та енергії, що забезпечує значне зменшення часу розрахунку та проектування в порівнянні з існуючими методами. З одного боку дає можливість організувати гарні енергетичні процеси з іншого коли ми водимо електронну частину значно зменшується час чисельного розрахунку конструкції та верифікацій варіантів конструктивного виконання. Це досягається за рахунок процесного представлення, з одного боку за рахунок врахування явища переносу на етапі розрахунку, з іншого узгодженість комп'ютерної частини за рахунок інформаційно-енергетичного переносу. Розроблена блок схема ілюструє запропонований інформаційно-енергетичний підхід переносу в мехатронній системі при аналізі її поведінки, переходів потоку

інформації в потік енергії виконавчої системи (сигнал, дія, результат) (рис. 1). На першому кроці потік інформації перетворюється в потік пневматичної, гідравлічної, електричної енергії у виконавчих блоках та елементах системи коефіцієнтами переносу (рис. 1). Рух робочого органу в такій системі в ряді випадків може здійснюватися від гідравлічних приводів. У гідроприводах відбувається триступеневе перетворення енергії. Спочатку електрична або тепла енергія перетворюється в механічну, а потім в гідравлічну. Для початкового перетворення енергії використовують електродвигуни, рідше двигуни внутрішнього згорання або ручний привід. Перетворення механічної енергії в гідравлічну виконується гідравлічними насосами та характеризується коефіцієнтами переносу у системі приводу в робочому середовищі. Від коефіцієнтів переносу залежить відповідність робочих характеристик їх розрахунковим значенням при проектуванні системи. Як показує практика у змінних умовах експлуатації системи відбувається зміна енергетичного балансу. Наприклад зміна теплообміну у системі впливає на робочі процеси та відповідно призводить до зміни коефіцієнтів переносу та робочої характеристики системи в цілому, а саме її точності позиціонування, витрати робочої рідини та швидкості руху робочого органу. Зміна робочої характеристики приводу або системи потребує постійної корекції її характеристики та призводить до зміни робочих параметрів машини, ККД. Тому відомими способами для компенсації змін є впровадження систем які дозволяють проводити автоматичну корекцію, що проводиться у апаратах системи приводів через зміну значень коефіцієнтів переносу та організації робочих режимів у форматі нейронної мережі. Якщо розглядати нейронну мережу, то поточні параметри коефіцієнтів переносу є одним з визначальних показників для корекції системи приводу за певним законом та потребують врахування при розробці компенсаторів і зворотного зв'язку. Явища переносу розглядають як правило на трьох ієрархічних рівнях (масштабах): макроскопічний, мікроскопічний, молекулярний.

В залежності від фізичної природи процесів і законів описуючих їх, розрізняють:

- гідромеханічні процеси (перенос кількості руху);
- теплові процеси;
- масообмін (дифузійні процеси);
- хімічні (реакції) процеси;
- механічні процеси.

Явища переносу описуються наступними законами: перенос імпульсу (кількості руху), закон в'язкості Ньютона, перенос маси, закон дифузії Фіка, перенос тепла, теплопровідність закон Фур'є.

Відшукаємо залежність енергетичного ресурсу через перенос інформації  $A_i$ , у векторній формі згідно із наведеними вище законами. Закон інформаційного переносу: кількість інформації, яку переносять через площину, перпендикулярну напрямленню, уздовж якого спостерігається градієнт енергії, прямо пропорційний сигналу переносу, площі площини до градієнту енергії:

$$A_i = -v \operatorname{grad} E, \quad (1)$$

де  $v$  – сигнал,  $E$  – енергія (“комплекс енергій”).

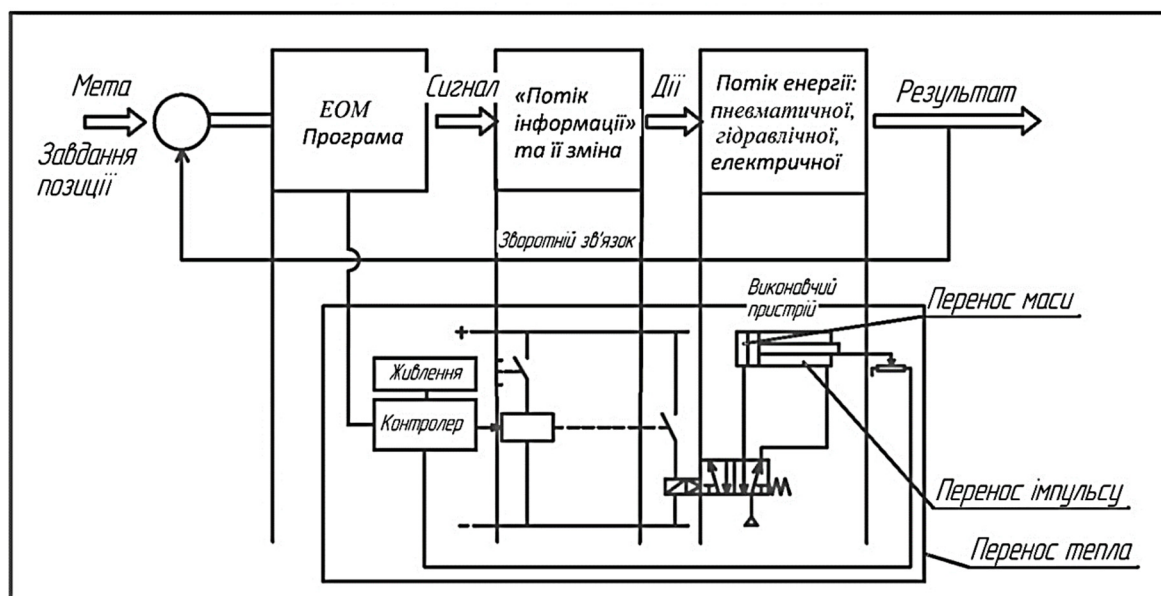


Рис. 1. Схема інформаційно-енергетичного переносу при аналізі поведінки мехатронної системи

### Застосування підходу для вирішення даного класу задач на прикладі тарілчастого клапану

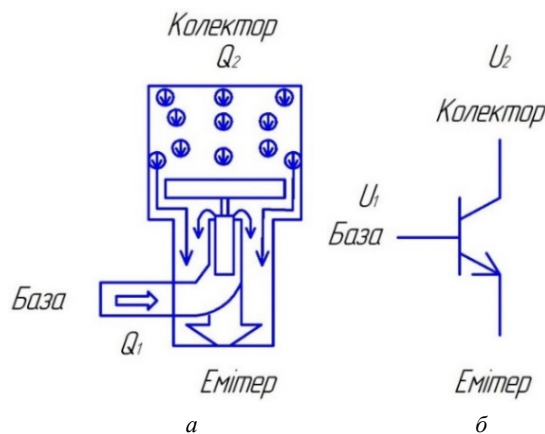
Запропонований підхід пов'язаний з розробкою методики і схеми розрахунку технічної системи на прикладі клапану. На першому кроці було розглянуто задачу процесу переносу на прикладі тарілчастого клапану. В клапані виникає перетворення енергії на вході та на виході в місцевих опорах дроселях з подальшою дисипацією енергії. Ця енергія забезпечує перехідні процеси, які можна представити постулатами першого початку термодинаміки через рівняння складання балансу енергії в процесах переносу.

$$E = (E_k + E_n + E_g),$$

де  $E_g$  – внутрішня енергія.

$$[\text{зміна енергії}] = [\text{приток енергії}] + [\text{загальна продуктивність джерел енергії}] [5, 15]$$

Також слід зазначити, що окрім перетворення енергії на вході та виході відбувається в'язке тертя в дросельних елементах клапану у відповідності до закону Ньютона, що призводить до зміни температури робочої рідини, яка впливає на коефіцієнт переносу в'язкості робочої рідини. Такі клапани потребують постійної корекції прохідного перерізу у змінних умовах експлуатації за визначеним законом. Для корекції робочої характеристики клапану можна використати інформаційний сигнал з датчика. Якщо електричну мережу порівняти з гідравлічною системою, то транзистор - це клапан, що регулює потік рідини. Так само, як простим поворотом клапана можливо затримати або пустити величезний обсяг рідини, так само транзистор дозволяє малопотужному потоку електричної енергії регулювати значно більший потік, таким чином збільшуючи його потужність. На рис. 2 наведено рідинно – механічний аналог біполярного транзистора з n-p-n провідністю. Наведений приклад ілюструє, що невеликий струмінь з базової лінії управляє “великим” струменем рідини з колекторної лінії. При цьому струмінь з емітерної труби буде складатися із сум потоків базової і колекторних труб рис. 2, а, б.



**Рис. 2.** Робота тарілчастого клапану з аналогією транзистора  
(а – аналогія рідини-тарілчастий клапан, б – транзистор-електрично керований вимикач)

Транзистор це ворота, що можуть бути або відчинені, або зачинені, що представляється як 1 або 0. Нейрони теж цифрові (вони можуть збуджуватись або не збуджуватись), але вони можуть бути й аналоговими - передавати неперервні сигнали так само, як і дискретні.

Електро-гідравлічна аналогія дозволяє замінити в деяких випадках гідравлічний або пневматичний клапан на електричний аналог без втрати характеристики модуля механотронного об'єкту та перейти на іншу технічну реалізацію та виконання конструктивного рішення на іншій базі технічної реалізації “за запитом”.

Наступним кроком було використано математичну залежність інформаційно-енергетичного переносу (1) для вирішення задачі розрахунку і проектування елементів тарілчастого клапану. Для цього було запропоновано підхід який покладено в основу алгоритму з врахуванням коефіцієнтів переносу в'язкості. Початковими даними є: формування вимог, вибір параметрів середовища та сукупності явища процесу переносу і вибір початкових та граничних умов. За заданим функціональним аналізом обирається вибір чисельного методу розрахунку, визначаються фактори та коефіцієнти переносу, наприклад, для тарілчастого клапану це буде кінематична або динамічна в'язкість. Відповідно до значень в'язкості, поточних значень швидкості руху робочої рідини у дроселях та площ дроселів, які приймають постійними, визначають число Рейнольдса. За величиною числа Рейнольдса на основі математичних залежностей розраховується коефіцієнт витрати. Значення коефіцієнту витрати використовується у віртуальній моделі тарілчастого клапану для розрахунку поточної витрати крізь дроселі.

Алгоритм реалізовано у вигляді програмного модулю, який використано в математичній моделі тарілчастого клапану. Це дозволило враховувати вплив температури та режими руху робочої рідини на коефіцієнт переносу витрати у дроселях щільні тарілчастого клапану. Після синтезу тарілчастого клапану отримано конструкцію клапану та проведена віртуальна та фізична візуалізації картин течії та їх якісна оцінка значень. Запропонований алгоритм було отримано під кутом побудови моделі підходом переносу та залежності переносу і інформації (рис. 3). Розробка технічної системи на основі процесів переносу та інформації про систему дає нові можливості для застосування розумних матеріалів у якості системи приводу автоматичної корекції провідності дроселів з застосування “трекеру” на базі термочутливих приводів, таких як, нітінол та біметал, п’єзо приводу або магнітореологічної рідини, де керування зводиться до кореляції коефіцієнтів переносу у робочому середовищі [23, 24].

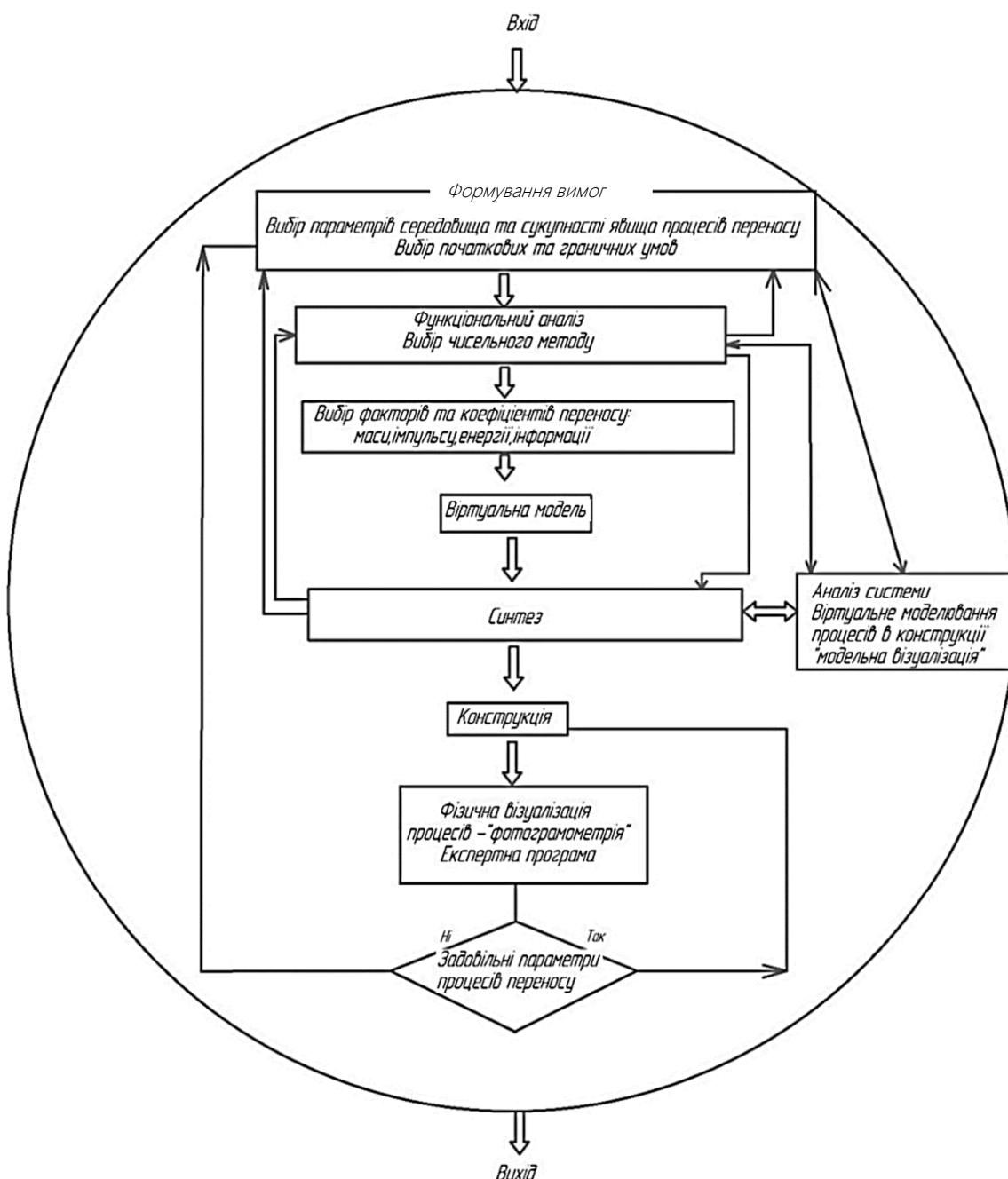
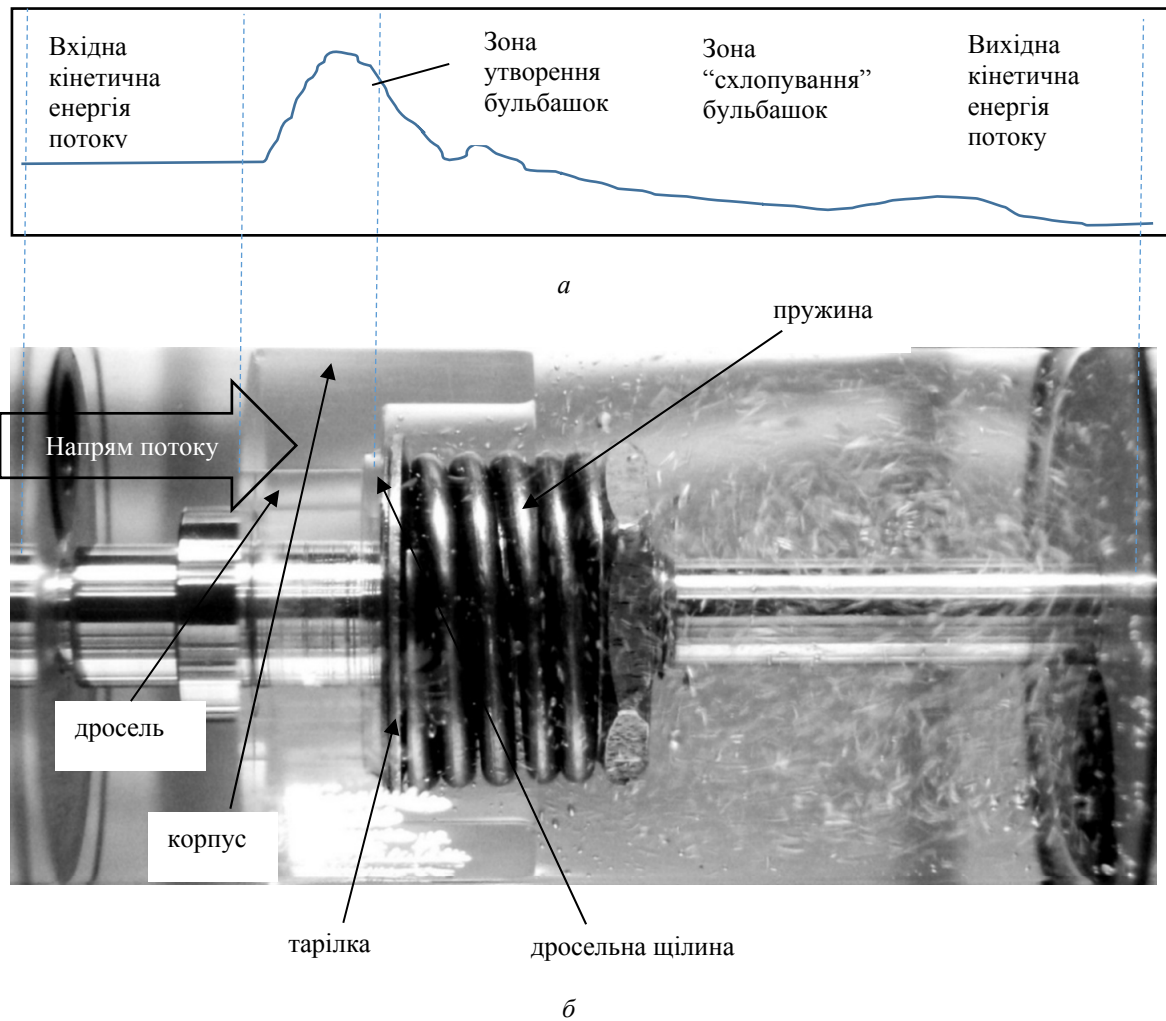


Рис. 3. Структура запропонованого алгоритму моделі з застосуванням підходу інформаційно-енергетичного переносу

Проведені експериментальні дослідження показали, що за певних умов в проточній камері клапану виникають місцеві зони пониженого тиску, тобто можливий розрив потоку. Який виникає при пониженні тиску до величини близької до тиску насичених парів (рис. 4). При зменшенні тиску нижче рівня тиску насиченої

пари утворюються бульбашки, а при подальшому збільшенні вказаного тиску відбувається схлопування бульбашок. Спостерігалися форми розривів, що відрізняються великою різноманітністю (скупчення дрібних бульбашок, які потім несуться потоком) (рис. 4). Проведені експерименти в наведеному вище діапазоні змін параметрів дозволили визначити режими руху та структуру течії двофазного потоку в дросельній щілині та проточній камері клапану. У разі проходження потоку рідини крізь дросельний отвір відбувається перерозподіл енергії потоку між її потенційною та кінетичною складовими (рис. 4 а). При цьому потенційна складова – тиск зменшується, а кінетична складова – швидкість збільшується. Враховуючи викладене вище, можна зробити наступні висновки, що кавітаційні явища можна представити через енергетичні зв'язки, зокрема з її можливою емісією в термоелектричну, хімічну енергію [4, 16]. Рис. 4, а, також ілюструє результати зміни енергії у клапані та втрати енергії-зміни енергоємності.



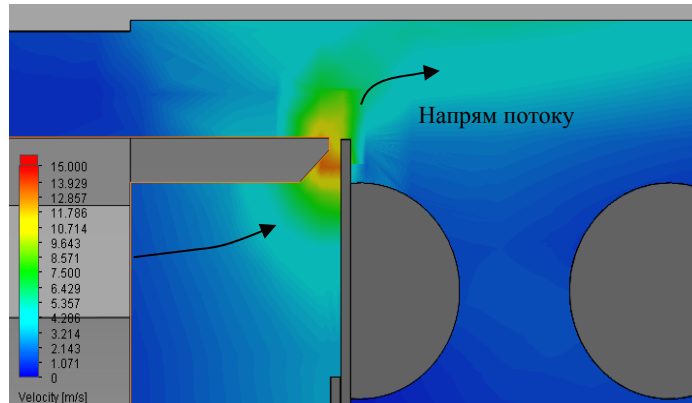
**Рис. 4.** Структура течії двофазного потоку в дросельній щілині та проточній камері клапану ( $\Delta p = 15$  бар,  $t = 20$  °С,  $Q = 6 \cdot 10^{-5}$  м<sup>3</sup> / с, площа поперечного перерізу 1,61 мм<sup>2</sup>) при швидкості фото зйомки 200 кадрів в секунду (б) (а) графік процесів зміни енергії при проходженні потоком рідини через дросельний елемент

Далі було проведено чисельне моделювання з застосуванням розробленого алгоритму в твердотільній моделі тарілчастого клапану (рис. 5). Процес математичного моделювання виконувався в пакеті SolidWorks наступним чином: перепад тиску  $\Delta p = 15$  бар, температура робочого середовища  $t = 20$  °С, переміщення тарілки клапану складало 3 мм відносно бази стінки сідла. Ядром пакету є блок чисельного розв'язання рівняння руху рідини Нав'є-Стокса. Також слід відмітити, що при математичному моделюванні було помічено, що крок та розмір сітки моделі, кавітаційні режими, з можливим врахуванням коефіцієнтів турбулентної в'язкості збільшують час моделювання в сотні разів. Час моделювання та результати розрахунку у вигляді інформації використовують для проектування системи.

Моделювання проводилось для різних режимів роботи при заданому перепаді тиску, що відповідає умовам експлуатації клапану. Для цього було побудовано твердотільні моделі елементів клапану та імітатора корпусу, потім ці елементи було поєднано у вузол, а сам вузол було розміщено в імітаторі корпусу. В моделі

твердотілого клапанного вузла та імітатора корпусу було використано значення параметрів, що відповідають параметрам клапану, який досліджувався експериментально.

При моделюванні процесів були задані умови однакові з умовами фізичного експерименту. Для перевірки адекватності моделей, побудованих в інженерному пакеті SolidWorks, було виконано порівняння результатів моделювання з результатами фізичного експерименту. Порівняння показало задовільне співпадіння, при цьому відносна похибка для витрати робочої рідини в інтервалі перепадів тиску 15 бар становила не більше 30 %.



**Рис. 5.** Розподілення швидкості в дросельній щілині та проточній камері тарілчастого клапана ( $\Delta p=15$  бар,  $t=20^{\circ}\text{C}$ ,  $Q=0.00006$  м<sup>3</sup>/с, площа поперечного перерізу 1,61мм<sup>2</sup>)

В результаті імітаційного моделювання розподіл швидкостей (рис. 5) у перерізі клапану дозволили підтвердити найбільш вразливі ділянки тарілчастого клапана, якими являється сідло та тарілка. Також встановлено, що в зоні дроселювання відбувається локальне підвищення швидкості руху робочої рідини, що призводить до порушення суцільності потоку та можливості виникнення кавітації та спінення робочої рідини.

### Результати та їх обговорення

Запропонований підхід для вирішення даного класу задач, значно спрощує та скорочує процеси фізичного моделювання. Які пов'язані з досить великими економічними та часовими затратами розробки механічної моделі, а саме її вдосконалення під час експерименту, вибору раціональних параметрів конструкції.

Отримані експериментальні данні у фізичному експерименті дозволили розрахувати числові межі зміни значень коефіцієнтів переносу, і уточнити математичну модель роботи тарілчастого клапану та розрахувати оптимальні коефіцієнти переносу.

На наступному кроці було співставлено характеристики структури течій потоку в каналах вузла дроселювання для фізичного (рис. 4, а, б) та модельного (рис. 5) експериментів. Порівняння (рис. 5) показує, що процеси, які отримані в ході математичного моделювання задовільно повторюють характер протікання реальної рідини через дросельну щілину. На рис. 5 проілюстровані траєкторія руху рідини з температурною градацією тиску. Зони з зеленим і синім кольором вказують на падіння тиску значно нижче атмосферного, синя зона вказує на падіння тиску нижче рівня тиску насичених парів деяких рідин, що є характерною ознакою наявності кавітації.

Підсумовуючи подані вище результати, відзначимо, що представлений інформаційно енергетичний підхід є цілком корисним для постановок та вирішення певного класу задач гідродинаміки та механотроніки з зменшенням часового проміжку отримання готового модулю технічної системи замовнику. Даний підхід був також апробований при побудові магнітно реологічного демпфера. Інформаційно-енергетичний перенос також можливо представити через, інформаційну ентропію обчислення – є заряд, енергія, маса, які представляється числом тобто через фізичні константи у відповідності масиву даних. Константи процесу переносу показують абсолютні межі обчислювальної ентропії для оберненого функціонального аналізу, а процес їх оцінки полягає в розробці масштабно-інваріантної обчислювальної системи [14].

### Висновки

Енергія являється основною характеристикою стану фізичного об'єкту. Врахування процесів переносу та переносу інформації і дає можливість оцінити на етапі дослідження та проектування протікаючі процеси, що відбуваються в механічних та гідромеханічних системах.

Запропонований алгоритм покладено в основу підходу який можна використати для серії задач систем гідроприводу у складі модулів механотронних систем амортизації, клапанів [18–21]. Розглянуті процеси переносу в тарілчастому клапані за запропонованим алгоритмом з врахуванням коефіцієнтів переносу та



інформаційного переносу можуть організувати більш ефективні робочі процеси при певних умовах. Тому використання інформаційно-енергетичного підходу до аналізу поведінки фізичних об'єктів є пріоритетним напрямком вдосконалення фундаментальних та прикладних методів досліджень серед інших підходів. Починаючи від процесів переносу кількості руху, перемішування рідин, стиснення та перемішування газів, розділення рідких та газових неоднорідних систем в полі сил тяжіння, відцентрових сил, рух рідини або газу під дією перепаду тиску через дроселі, фільтруючі елементи, перемішування рідини.

Використання цього підходу забезпечує високий ступінь адекватності побудови математичних моделей на етапі дослідження та проектування системи та зменшує час для створення систем. Показано можливість застосування інформаційно-енергетичного переносу (1) сигналу через градієнт енергії до розгляду та аналізу системи на прикладі тарілчастого клапану з застосуванням технічної візуалізації. Результати показують доцільність застосування запропонованого підходу для вирішення задач які вирішуються традиційним способами. Запропонований інформаційно-енергетичний підхід дає можливість створити системи гідропневмоприводів та апаратів з високою енергоефективністю, швидкодією, з гнучким переналаштуванням робочої характеристики за вимогою по команді від комп'ютера або контролера.

## References

1. Канигін Ю.Н. Шлях Аріїв: Україна в духовній історії людства / Юрій Михайлович Канигін. – [5-те вид., допов.]. – [Київ: А.С.К., 2004]. – 255 с.
2. Слесарев М. Ю. Мехатроника и развитие техносферы // Мехатроника. 2000. № 1. С. 11—16.
3. Бруязкий Е. В. Метод контрольного объема в компьютерной гидродинамике / Е. В. Бруязкий А. Г. Костин, Е. И. Никифорович – Киев : Милениум, 2016.– 520 с.
4. 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,
5. DOI:<http://dx.doi.org/10.20535/2305-9001.2016.78.73382>.
6. Шорин С. Н. Теплопередача. – М. : Высшая школа, 1964. – 490 с.
7. Сычев В. А. Системный инжиниринг — процессы и стандарты // Молодой ученый. – 2018. – №32. – С. 17–22. URL <https://moluch.ru/archive/218/52310/> (дата обращения: 08.02.2020).
8. Yue, D. Meng, J. Lu, M. L. C. Chen, M. Guo, Y. Huang, Understanding microRNA Regulation, A computational perspective, IEEE Signal Processing Magazine, Jan. 2012, vol. 29, no. 1, P. 77–88.
9. Xuan, P. Guo, M. Liu, X. Huang, Y. Li, W. Huang, Y. PlantMiRNAPred: efficient classification of real and pseudo plant pre-miRNAs (2011) Bioinformatics 27: 1368–1376.
10. Liu, H. Yue, D. Chen, Y. Gao, S-J Huang, Y. A Bayesian Approach for Identifying miRNA Targets by Combining Sequence Prediction and Gene Expression Profiling,” BMC Genomics, 2010, 11(Suppl 3). P. 12. doi:10.1186/1471-2164-11-S3-S12
11. H. Liu, D. Yue, Y. Chen, S-J Gao, Y. Huang, Improving Performance of Mammalian MicroRNA Target Prediction,” BMC Bioinformatics, 2010; 11: 476. doi: 10.1186/1471-2105-11-476..
12. J. Meng, Y. Chen, S-J Gao, Y. Huang, “Robust inference of the context specific structure and temporal dynamics of gene regulatory network.” BMC Genomics, 2010 11(Suppl 3). P. 11. doi: 10.1186/1471-2164-11-S3-S11.
13. Шеннон К.Э. Работы по теории информации и кибернетике. Перевод с английского. Под редакцией Р.Л. Добрушина и О.Б. Лупанова. Москва: Издательство иностранной литературы, М., 1963.
14. Уилер Д.ж., Гаррисон В., Вакако М., Торн К., Теория гравитации и гравитационный коллапс, пер. с англ., М., 1967.
15. Eugene Machusky Complex Geometry of Wave Motion International Journal of Engineering and Technology, Vol. 10, No. 2, April 2018 p. 184–188.
16. 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.
17. Седов, Л.И. Виды энергии и их трансформации / Л. И. Седов // Прикладная математика и механика. – 1981. – Вып. 6, Т. 45. – С. 964 – 984.
18. Х. Экснер, Р. Фрейтаг, Р. Ланг Гидропривод основы и компоненты Учебный курс по гидравлике, Кемп Х.(редактор) том 1. – Германия : Издательство Бош Рексрот, 2003. – 322 с.
19. Experimental research of hydroluminescence in the cavitating flow of mineral oil/Ihor V. Nochnichenko; Alexandr F. Luhovskyi; Oleg M. Jakhno; Dmytro V. Kostiuk; Paweł Komada; Ainur Kozbakova, Proc. SPIE 11176, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments 2019, Vol. 1117615 (6 November 2019); doi: 10.1117/12.2536946.
20. Ночніченко І.В. Study of hydrodynamic luminescence in a cavitation liquid medium /Ночніченко І.В., Луговський О.Ф., Костюк Д.В. // Науково-технічний журнал «Проблеми тертя та зношування». 2019. № 3(84), – С. 57-62 doi:10.18372/0370-2197.3(84).13853.
21. 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. – С. 54–62. doi: 10.20535/1810-0546.2018.4.141241.
22. Luhovskyi O.. Temperature influence on cavitation mass transfer in the channel of laval nozzle type / I. Nochnichenko, O. Jakhno, D. Kostiuk // Journal of the Technical University of Gabrovo, 2018. – No. 57, I. – Gabrovo, Bulgaria, pp. 12 – 15, 2018 p.
23. The character of the transfer phenomenon in the work processes of the hydraulic damper / I. Nochnichenko, O. Jakhno, I. Liberatskyi // International scientific conference proceedings «Unitech 2019», 16–17 November, 2019. – Gabrovo, Bulgaria, 2019. – P. 273 – 277.

24. Узунов О. В. Системне представлення складних технічних об'єктів в задачах аналізу та синтезу / О.В. Узунов // Вісник Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут". Серія: Машинобудування. – 2016. – № 1. – С. 126–132. Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/VKPI\\_mash\\_2016\\_1\\_19](http://nbuv.gov.ua/UJRN/VKPI_mash_2016_1_19).
25. Буч Г. Объектно-ориентированное проектирование с примерами применения. – М.:Конкорд, 1992. – 519. с.

## Информационно-энергетический подход к решению задач гидродинамики и мехатроники в процессах переноса энергии

Ночниченко Игорь, Яхно Олег

**Аннотация.** В статье рассмотрен подход физических аспектов процессов переноса. Под углом главного постулата термодинамики - преобразование тепловой энергии в механическую работу и наоборот, был рассмотрен энергетический баланс в тарельчатом клапане. Приведена схема взаимодействия системы через процесс переноса, функционирования и проиллюстрировано аналогии между тарельчатым гидравлическим клапаном и электрическим транзистором. Показано, что теплота является одной формой энергии, которая может превращаться в другие формы. В результате численной и физической визуализации установлено, что при движении жидкости в тарельчатом клапане возникают различные физические процессы переноса. Например кавитации, при которой происходит существенное изменение энергетического баланса и диссипация энергии при не стационарных режимах движения жидкости. В первом приближении сделана попытка связать уравнения явления переноса с информационным переносом через сигнал и градиент энергии.

Приведенный информационно-энергетический подход и алгоритм приемлем для постановок и решения задач по неидеализированных механических и гидромеханических систем, находящихся в диссипативных процессах. В статье приведены принципы, которые могут быть использованы для проектирования аппаратов и модулей мехатронных систем.

**Ключевые слова:** явление переноса; информационно-энергетический перенос; вязкость; температура, тепловой поток; система; синтез; системный инжиниринг; информационная энтропия; энтропийный потенциал; кавитация; процесс; фотограмметрия; техническая визуализация, мехатроника.

## Information and energy approach to solving problems of hydrodynamics and mechatronics in energy transfer processes

Nochnichenko Igor, Yakhno Oleg

**Abstract.** The article considers the approach of the physical aspects of transfer processes. From the angle of the main postulate of thermodynamics - the conversion of thermal energy into mechanical work and vice versa, the energy balance in a poppet valve was considered. A diagram of the interaction of the system through the process of transfer, operation, and an analogy between a poppet hydraulic valve and an electric transistor is illustrated. It is shown that heat is one form of energy that can be converted into other forms. As a result of numerical and physical visualization, it has been established that when the fluid moves in a poppet valve, various physical transfer processes occur. For example, cavitation, in which there is a significant change in the energy balance and energy dissipation under non-stationary modes of fluid motion. As a first approximation, an attempt is made to connect the equations of the transport phenomenon with information transfer through an energy gradient.

The given information-energy approach and algorithm are acceptable for formulating and solving problems on non-idealized mechanical and hydromechanical systems that are in dissipative processes. The article describes the principles that can be used to design apparatuses and modules of mechatronic systems.

**Keywords:** transfer phenomenon; information and energy transfer; viscosity; temperature, heat flux; system; synthesis; system engineering; informational entropy; entropy potential; cavitation; process; photogrammetry technical visualization, mechatronics.

### References

1. Yurii Mykhailovych Kanyhin (2004), *Shliakh Ariiv: Ukraina v dukhovnii istorii liudstva* [Ukraine in the spiritual history of humanity], A.S.K, Kyiv, Ukraine.
2. Slesapev, M.Yu. (2000), *Mekhatronika i pazvitie tekhnosfery* [Mechatronics and the development of the technosphere] Mekhatronika, vol. 1, pp. 11–16.
3. Bruyatskii, E.V., Kostin, A.G. and Nikiforovich, E.I. (2016), *Metod kontrol'nogo ob'ema v komp'yuternoi gidrodinamike* [Control volume method in computer hydrodynamics], Milenium, Kyiv, Ukraine.
4. Yakhno, O.M. and Machuha, O.S. (2016), *Ekserhiinyi analiz ta metod variatsiinykh nerivnostei v deiakykh zadachakh hidromekhaniky, Jurnal of Mechanical Engineering NTUU "KPI"*, vol. 78, no. 3, pp. 19–25, DOI:<http://dx.doi.org/10.20535/2305-9001.2016.78.73382>.
5. Shorin, S.N. (1964), *Teploperedacha* [Heat transfer], M.: Vysshaya shkola.
6. Sychev, V.A. (2018), *Sistemnyi inzhiniring – protsessy i standarty* [Systems Engineering - Processes and Standards], Molodoi uchenyi, no. 32, pp. 17–22, URL <https://moluch.ru/archive/218/52310/> (data obrashcheniya: 08.02.2020).
7. Yue, D., Meng, J., Lu, M., Chen, C.L., Guo, M. And Huang, Y. (2012), *Understanding microRNA Regulation, A computational perspective*, IEEE Signal Processing Magazine, vol. 29, no. 1, pp. 77–88.

9. Xuan, P., Guo, M., Liu, X., Huang, Y., Li, W. and Huang, Y. (2011), PlantMiRNAPred: efficient classification of real and pseudo plant pre-miRNAs *Bioinformatics*, no. 27, pp. 1368–1376.
10. Liu, H., Yue, D., Chen, Y., Gao, S-J, Huang, Y. and Bayesian, A. (2010), Approach for Identifying miRNA Targets by Combining Sequence Prediction and Gene Expression Profiling,” *BMC Genomics*, 11(Suppl 3):S12 doi:10.1186/1471-2164-11-S3-S12.
11. Liu, H., Yue, D., Chen, Y., Gao, S-J and Huang, Y. (2010), Improving Performance of Mammalian MicroRNA Target Prediction,” *BMC Bioinformatics*, 11: 476. doi: 10.1186/1471-2105-11-476.
12. Meng, J., Chen, Y., Gao, S-J and Huang, Y. (2010), “Robust inference of the context specific structure and temporal dynamics of gene regulatory network,” *BMC Genomics*, 11(Suppl 3), doi: 10.1186/1471-2164-11-S3-S11.
13. Shannon, K.E. (1963), *Raboty po teorii informatsii i kibernetike. Perevod s angliiskogo* [Works on information theory and cybernetics. Translation from English], Pod redaktsiei R.L. Dobrushina i O.B. Lupanova, Izdatel'stvo inostrannoi literatury, Moscow, Russia.
14. Uiler, D zh., Garrison, V., Vakako, M., Torn, K. (1967), *Teoriya gravitatsii i gravitatsionnyy kollaps* [Gravity theory and gravitational collapse], per. s angl., Moscow, Russia.
15. Eugene Machusky (2018), *Complex Geometry of Wave Motion International Journal of Engineering and Technology*, vol. 10, no. 2, April pp. 184–188.
16. Fermi, Enrico (1973), *Termodinamika* [Thermodynamics] : per. s angl. Enrico Fermi; Izdatel'stvo KhGU, Khar'kov, Ukraine.
17. Sedov, L.I. (1981), *Vidy energii i ikh transformatsii* [Types of energy and their transformation], *Prikladnaya matematika i mekhanika*, vol. 6, no. 45, pp. 964–984.
18. Kh. Eksner, R. Freitag, R. Lang (2003), *Gidroprivod osnovy i komponenty Uchebnyi kurs po gidravlike* [Hydraulic Basics and Components Hydraulics Training Course], in Kemp Kh. (ed.), vol. 1. Germaniya : Izdatel'stvo Bosh Reksrot.
19. Ihor V. Nochnichenko; Alexandr F. Luhovskyi; Oleg M. Jakhno; Dmytro V. Kostyuk; Paweł Komada; Ainur Kozbakova (2019), 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); doi: 10.1117/12.2536946.
20. Nochnichenko, I.V., Luhovskyi, O.F. and Kostyuk, D.V. (2019), Study of hydrodynamic luminescence in a cavitation liquid medium, *Naukovo-tekhnichnyi zhurnal “Problemy tertia ta znoshuvannia”*, vol. 84, no. 3, pp. 57–62 doi:10.18372/0370-2197.3(84).13853.
21. Nochnichenko, I.V. and Yakhno, O.M. (2018), Zastosuvannia yavyscha perenosu ta informatsiinoi entropii do analizu povedinky mahnitoreolohichnoho dempfera, *Naukovi visti NTUU “KPI” naukovo-tekhnichnyi zhurnal*, no. 4 (120). pp. 54–62. doi: 10.20535/1810-0546.2018.4.141241
22. Luhovskyi, O., Nochnichenko, I., Jakhno, O. and Kostyuk, D. (2018), Temperature influence on cavitation mass transfer in the channel of laval nozzle type, *Journal of the Technical University of Gabrovo, Gabrovo, Bulgaria*, no. 57 I. pp. 12 –15.
23. Nochnichenko, I., Jakhno, O. and Liberatskyi, I. (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, pp. 273–277.
24. Uzunov, O.V. (2016), Systemne predstavleniia skladnykh tekhnichnykh ob'ektiv v zadachakh analizu ta syntezy, *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu Ukrainy “Kyivskiy politekhnichnyi instytut”*. Seriya Mashynobuduvannia, no. 1, pp. 126–132. Rezhym dostupu: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/VKPI\\_mash\\_2016\\_1\\_19](http://nbuv.gov.ua/UJRN/VKPI_mash_2016_1_19).
25. Buch, G. (1992), *Ob'ektno-orientirovannoe proektirovanie s primerami primeneniya* [Object Oriented Design with Case Studies], M.:Konkord.