

**МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІКИ ЗМІНИ РЕЖИМУ ТЕЧІЇ РІДИНИ  
В СУДНОВОМУ ТРУБОПРОВОДІ ПРИ ПІДГОТОВЦІ  
МОРСЬКИХ ІНЖЕНЕРІВ**

**С.О. Яремчук<sup>1</sup>, І.З. Маслов<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>к. т. н., доцент кафедри управління в транспортній галузі,  
Дунайський інститут Національного університету «Одеська морська академія», Ізмаїл,  
Одеська область, Україна,  
ORCID ID: 0000-0002-6736-1471

<sup>2</sup>к. т. н., доцент, завідувач кафедри судових енергетичних установок і систем,  
Дунайський інститут Національного університету «Одеська морська академія», Ізмаїл,  
Одеська область, Україна,  
ORCID ID: 0000-0003-1759-6077

**Анотація**

**Вступ.** Одна із проблем безпеки судноплавства полягає в неправильній оцінці членами екіпажу швидкості та сили фізичних явищ, що спричинюють аварійну ситуацію. Не менш значущими для безпеки судна є проблеми надійної експлуатації суднових трубопроводів. Агресивний вплив різновидів суднового палива, та режиму течії рідини призводять до руйнування поверхонь труб, зношення та вібрації трубопроводів та арматури, що обґрунтовує актуальність досліджень фізичних процесів в області молекулярної фізики та механіки суцільних середовищ. **Метою** роботи є розвиток фахових компетентностей морських інженерів шляхом моделювання динаміки зміни режиму течії рідини в судновому трубопроводі із застосуванням системно-структурного підходу та інформаційних технологій.

**Результати.** Розроблені структурні та функціональні схеми системи суднових трубопроводів. Розроблена покрокова методика дослідження руху рідини у прямих гладких циліндричних трубах. На лабораторному стенді НТЦ-11.38 «ГІДРАВЛІКА, ГІДРОМАШИНИ І ГІДРОПРИВОДИ» здобувачами освіти проведено експеримент, виконано розрахунки та візуалізацію результатів. Отримано графічне відображення динаміки зміни швидкості течії рідини. Встановлені значення, за яких турбулентні вихори рідини можуть призвести до виникнення явища гідродинамічної кавітації та кавітаційної корозії. **Висновки.** В роботі застосований інтегрований підхід до вивчення освітнього компоненту «Фізика», який поєднує знання та навички в області фізики, методології дослідження, та інформаційних технологій. Залучення курсантів до науково-дослідної роботи дало можливість розвинути наступні компетентності: практичні навички класифікації сутностей, навички роботи з лабораторним обладнанням, здатність застосовувати аналітичні та експериментальні методи для вирішення складних задач, та інформаційні технології для обчислень, здатність аналізувати результати та обґрунтовувати висновки дослідження.

**Ключові слова:** системно-структурний підхід, молекулярна фізика, інформаційні технології, судові трубопроводи, турбулентний режим.

THE MODELLING OF DYNAMICS  
OF FLUID FLOW REGIME CHANGE IN THE SHIP PIPELINE DURING  
THE TRAINING OF MARINE ENGINEERS

S.O. Yaremchuk<sup>1</sup>, I.Z. Maslov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>PhD, Associate Professor at the Department of Transport Management,  
Danube Institute of National University "Odessa Maritime Academy",  
Izmail, Odesa region, Ukraine,  
ORCID ID: 0000-0002-6736-1471

<sup>2</sup>PhD, Associate Professor, Head of the Department of Ship Power Plants and Systems,  
ORCID ID: 0000-0003-1759-6077

**Summary**

**Introduction.** One of the many safety problems of maritime shipping is the incorrect assessment by crew members of the vessel of the speed and strength of physical phenomena that cause an emergency. No less significant are the problems of reliable operation of numerous ship pipelines. Aggressive influence of marine fuel varieties and turbulent fluid flow mode lead to destruction of pipe surfaces, wear and vibration of pipelines and valves. These factors justify the relevance of studies of physical processes in the field of molecular physics and mechanics of continuous environments. **The purpose** of the work is the development of the professional competencies of marine engineers by the modeling the dynamics of changes in the fluid flow regime in the ship pipeline using a system-structural approach and information technologies. **Results.** Structural and functional diagrams of the ship pipeline system have been developed. A step-by-step method for studying the movement of liquid in straight smooth cylindrical pipes has been developed. At the laboratory stand "HYDRAULICS, HYDRAULIC MACHINES AND HYDRAULIC DRIVES" cadets conducted an experiment, calculated and visualized the results. The graphic display of fluid flow mode change dynamics is obtained. Calculated values at which turbulent liquid flows can lead to the occurrence of the phenomenon of the hydrodynamic cavitation and the cavitation corrosion. **Conclusions.** The work uses an integrated approach to the study of the educational component "Physics," which combines the knowledge and skills in the field of physics, the research methodology, and information technologies. The involvement of cadets in scientific and research work made it possible to develop the following competencies: practical skills in the classification of entities, skills in working with laboratory equipment, the ability to use analytical and experimental methods to solve complex problems, and information technologies for data processing, the ability to analyze information, formulate and substantiate the conclusions of the study.

**Key words:** system-structural approach, molecular physics, information technology, ship pipelines, turbulent mode.

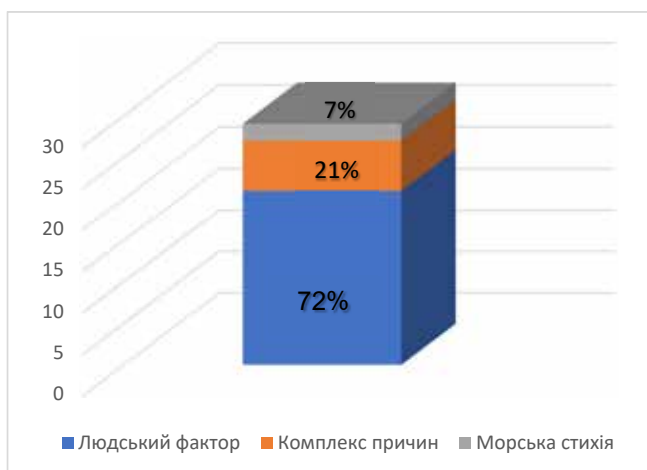
**Вступ.** Для здобувачів вищої освіти за спеціальністю 271 Морський та внутрішній водний транспорт важливим аспектом фахової підготовки є отримання знань та розуміння фізичних понять, законів, теорій, явищ та процесів, що застосовуються у сфері морської інженерії, та лежать в основі суднових систем. Невід'ємною складовою підготовки є набуття умінь користування інструментами, приладами, лабораторними установками та стендами для вимірювання фізичних величин, та набуття практичних навичок застосування сучасного

програмного забезпечення, як для розрахунків, так і для візуалізації отриманих результатів.

**Постановка проблеми.** Недостатні знання законів фізики морськими фахівцями є передумовою порушень правил безпеки та основною причиною численних морських катастроф та аварій. Результати аналізу тридцяти найбільших катастроф морських суден у XX столітті, описаних в роботі [1], зображені на *діаграма 1*, і відображають найпоширенішу причину катастроф – людський фактор (72%), або поєднання людського фактору з іншими причинами (21%). З опису та аналізу аварійних ситуацій відомо, що найчастіше це неправильна оцінка членами екіпажу судна динаміки та потужності фізичних явищ, які спричинюють аварійну ситуацію, що в результаті призводить до численних людських жертв, екологічних катастроф та великих фінансових втрат.

Як приклад, за інформацією з відкритих джерел [2], можна описати зіткнення пасажирського судна «Адмірал Нахімов» та балкера «Петро Васев» 31 серпня 1986 року в Цемеській бухті морського порту Новоросійськ. Після фатального зближення суден на небезпечно коротку відстань, та команди від капітана балкера «повний назад», незважаючи на те, що гребний гвинт вже працював на задній хід, балкер за інерцією продовжував рухатись вперед, і врізався в середину правого борту пасажирського судна, яке теж за інерцією продовжувало рухатися вперед, розвертаючи балкер, і збільшуючи розмір пробоїни. Через 8 хвилин судно повністю пішло під воду. Катастрофа мала трагічні наслідки, і забрала життя 359 пасажирів та 64 членів екіпажу.

Наведений приклад демонструє одну із проблем безпеки судноплавства, яка полягає в неправильній оцінці членами екіпажу судна швидкості та сили фізичних явищ, що спричинюють аварійну ситуацію. Не менш важливими є проблеми надійної експлуатації на судні численних трубопроводів. Турбулентні потоки рідини призводять до руйнування внутрішніх поверхонь труб, зношення та вібрації трубопроводів та арматури. Використання різновидів суднового палива створює нові ризики для надійної та безпечної експлуатації судових трубопроводів,



*Діаграма 1. Діаграма, що відображає відсотки причин тридцяти найбільших катастроф морських суден у XX столітті*

тому дослідження фізичних процесів в області молекулярної фізики, гідростатики та гідродинаміки є актуальними.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Трубопровід – це сукупність труб і різноманітної арматури (з'єднувальна, розгалужувальна, запірна тощо), призначена для транспортування різних речовин [3]. Під судновою трубопровідною системою розуміють сукупність численних трубопроводів, механізмів, пристроїв, установок, апаратів та приладів управління і контролю, призначених для виконання конкретних функцій.

Найпоширеніша проблема суднових трубопроводів – розгерметизація, яка відбувається за низки причин: руйнування поверхонь труб, зношення та вібрація трубопроводів та трубопровідної арматури, понаднормове збільшення тиску, замерзання рідини при низьких температурах, корозія труб та арматури внаслідок впливу агресивних середовищ.

Проблеми експлуатації суднових трубопроводів, що виникають через їх пошкодження внаслідок впливу агресивних середовищ, створюваних різновидами суднового палива, були розглянуті у роботах [4–6]. В роботі [4] було виконано аналітичний огляд технологічних проблем, пов'язаних з використанням водню в якості суднового палива. Транспортування великих об'ємів водню пов'язане з технологічними труднощами у зв'язку з дифузією водню крізь тверді матеріали та подальшим їх скрихненням. Водень спричинює руйнування сталі, це підвищує експлуатаційні витрати та об'єми витоків. Бункерування судна воднем наразі дуже проблематично через велику вартість інфраструктури. Впровадження водневих паливних систем на судах потребуватиме в майбутньому величезних інвестицій в інфраструктуру для транспортування, зберігання та розподілення водню.

В роботі [5] були проаналізовані фізичні та хімічні властивості суднового палива метанолу, та його вплив на суднові трубопроводи. Метанол – це конкурентоспроможне за вартістю та доступне за інфраструктурою морське паливо, він не потребує зберігання в криогенному стані, не потребує трубопроводів високого тиску, як для водню. Це спрощує його бункерування в існуючій інфраструктурі. Такі хімічні властивості метанолу, як невисока корозійна агресивність, запобігають передчасному зношенню устаткування та трубопроводів. Однак висока токсичність метанолу створює серйозну небезпеку для людини в разі його витоків. Метанолові суднові двигуни викидають в атмосферу на 90% менше шкідливих речовин. В даний час використання метанолу в якості екологічно чистого суднового палива активізується завдяки наступним факторам: здатності відповідати стандарту Tier III без додаткової обробки вихлопних газів; ефективним можливостям двопаливних двигунів; низькій вартості інфраструктури; збільшення виробництва та продажу метанолу на світовому ринку.

В роботі [6] були розглянуті проблеми, пов'язані з транспортуванням по судновому трубопроводу ще одного різновиду суднового палива – біодизелю (БД). БД має високу гігроскопічність і активно абсорбує вологу, тому є сприятливим середовищем для розмноження мікроорганізмів, які можуть призвести до закупорки фільтрів і трубопроводів, корозії паливної апаратури і виникнення відкладень біологічного походження в паливній системі. При низьких температурах

біопаливо втрачає рухливість, стає гелеобразним, кристалізується, що призводить до забивання фільтрів, трубопроводів, утруднення перекачування насосами. Перелік усіх несправностей суднової енергетичної установки (СЕУ) при використанні БД, та рекомендації щодо уникнення негативного впливу БД та ефективної експлуатації СЕУ потребують аналізу в окремому дослідженні.

Для ефективної експлуатації як діючих суднових трубопроводів, так і при конструюванні нових, фахівцям морської інженерії необхідні міцні знання класичних законів молекулярної фізики, механіки суцільних середовищ, гідростатики та гідродинаміки. Це закони Паскаля та Архімеда, рівняння Бернуллі, трубки Піто, формул Ньютона, Пуазейля та Стокса, описані у ґрунтовному навчальному посібнику [7]. Формули Ньютона, Пуазейля та Стокса характерні для *ламінарного* режиму течії рідини. При зростанні швидкості течії рідини характер течії істотно змінюється – у потоці рідини утворюються вихорі, шари рідини перемішуються між собою і сили опору різко зростають [7, с. 58]. Відбувається перехід від *ламінарного* режиму течії до *турбулентного*. Фізичні явища, пов'язані з режимом течії рідини та його змінами, здійснюють значний вплив як на рух судна, так і на експлуатацію суднових трубопроводів [8].

Суднові трубопровідні системи поділяються на дві основні групи: 1) загальносуднові трубопровідні системи; 2) трубопровідні системи суднових енергетичних установок. Системи цих двох груп можна класифікувати: 1) за родом транспортованої речовини; 2) за характером виконуваних функцій [3, 8]. Оскільки суднові системи складаються з багаточисленних трубопроводів, поділяються на групи, та різняться за ознаками, для отримання повної цілісної картини всієї системи є доцільним використання системно-структурного підходу – на пряму методології досліджень, що полягає у вивченні об'єкта як цілісної множини елементів у сукупності відношень і зв'язків між ними, тобто розгляд об'єкта як системи [9].

В той же час науково – дослідницька робота в області фізики передбачає необхідність розрахунків значень фізичних величин та їх похибок із заданою точністю, та графічного відображення отриманих результатів, що вимагає використання сучасних інформаційних технологій, які значно спрощують та пришвидшують процеси обчислення та візуалізації. Тому дослідження фізичних явищ в області молекулярної фізики та механіки суцільних середовищ із застосуванням системно-структурного підходу та інформаційних технологій є актуальною науково-технічною та педагогічною задачею, і обумовлює мету роботи.

**Мета та задачі роботи.** *Метою роботи* є розвиток фахових компетентностей морських інженерів шляхом моделювання динаміки зміни режиму течії рідини в судновому трубопроводі із застосуванням системно-структурного підходу та інформаційних технологій.

Для досягнення мети роботи необхідно виконати *наступні задачі*:

1. З використанням системно-структурного підходу розробити структурну та функціональну схеми системи суднових трубопроводів;
2. Розробити покрокову методику дослідження руху рідини у прямих гладких циліндричних трубах з урахуванням особливостей лабораторного стенду, та провести вимірювання фізичних величин;

3. З використанням інформаційних технологій виконати розрахунки, візуалізацію та аналіз отриманих результатів, сформулювати висновки, та визначити напрямки подальших досліджень.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** *Розробка структурної та функціональної схеми системи суднових трубопроводів.* Суднові трубопровідні системи трубопровідні поділяються на дві основні групи:

1) загально суднові трубопровідні системи; 2) трубопровідні системи суднових енергетичних установок. Всі системи цих двох груп можна класифікувати: 1) за родом речовини, яка переміщується по трубопроводу; 2) за характером виконуваних функцій, принципом дії і характером роботи. За родом речовини трубопроводи можуть транспортувати воду, повітря, пар, газ, нафтопродукти, хімічні речовини тощо.

Оскільки суднові трубопровідні системи складаються з багаточисленних трубопроводів, поділяються на групи, та різняться за ознаками, для отримання повної цілісної картини всієї системи доцільно використати системно-структурний підхід та побудувати багаторівневі класифікаційні структурні та функціональні схеми системи суднових трубопроводів. Це можливо зробити на основі огляду та аналізу робіт [3, 8], систематизації знань, та використання підсистеми SmartArt у текстовому процесорі MS Word. На рис. 1, 2, 3 показані класифікаційні багаторівневі структурні та структурно – функціональна схеми системи суднових трубопроводів, розроблені за участі здобувачів вищої освіти – курсантів Дунайського інститут Національного університету «Одеська морська академія» на практичному занятті з освітнього компоненту «Фізика».

На рис. 1 та 2 напівжирним шрифтом та голубим кольором позначена підсистема трубопроводу, досліджуваного курсантами на лабораторному занятті. Запропоновані схеми підлягають уточненню та доповненню курсантами при вивченні технічних дисциплін з експлуатації судна на наступних курсах навчання, однак дозволяють курсантам вже на першому курсі навчання: 1) отримати знання щодо структури, складу та функцій системи суднових трубопроводів; 2) розвивати компетентності щодо застосування системно-структурного підходу, як науково-дослідницької методології, яку вони зможуть в майбутньому використати в навчальних, професійних та наукових дослідженнях.

**Розробка покрокової методики** експериментального дослідження руху рідини у прямих гладких циліндричних трубах з урахуванням особливостей лабораторного стенду. **Об'єктом** експериментальної частини дослідження є трубопровід лабораторного стенду НТЦ-11.38 «ГІДРАВЛІКА, ГІДРОМАШИНИ І ГІДРОПРИВОДИ», використаний як прототип суднового трубопроводу.

**Предметом** є зміна динаміки руху рідини у прямих гладких циліндричних трубах. **Обладнання стенду** містить: два електродвигуни, три шестеренні насоси, аксіально-поршневий гідромотор, два гідроциліндри, шість гідро розподільників, та іншу направляючу та регулюючу апаратуру.

Інформаційно-вимірювальна система дозволяє вимірювати: витрати (три витратоміри інтегруючого типу); тиск (чотирнадцять манометрів і один вакуумметр); температуру робочої рідини (два термометри); час (два електронні секундоміри); швидкості вихідних ланок при поступальному та обертальному русі,

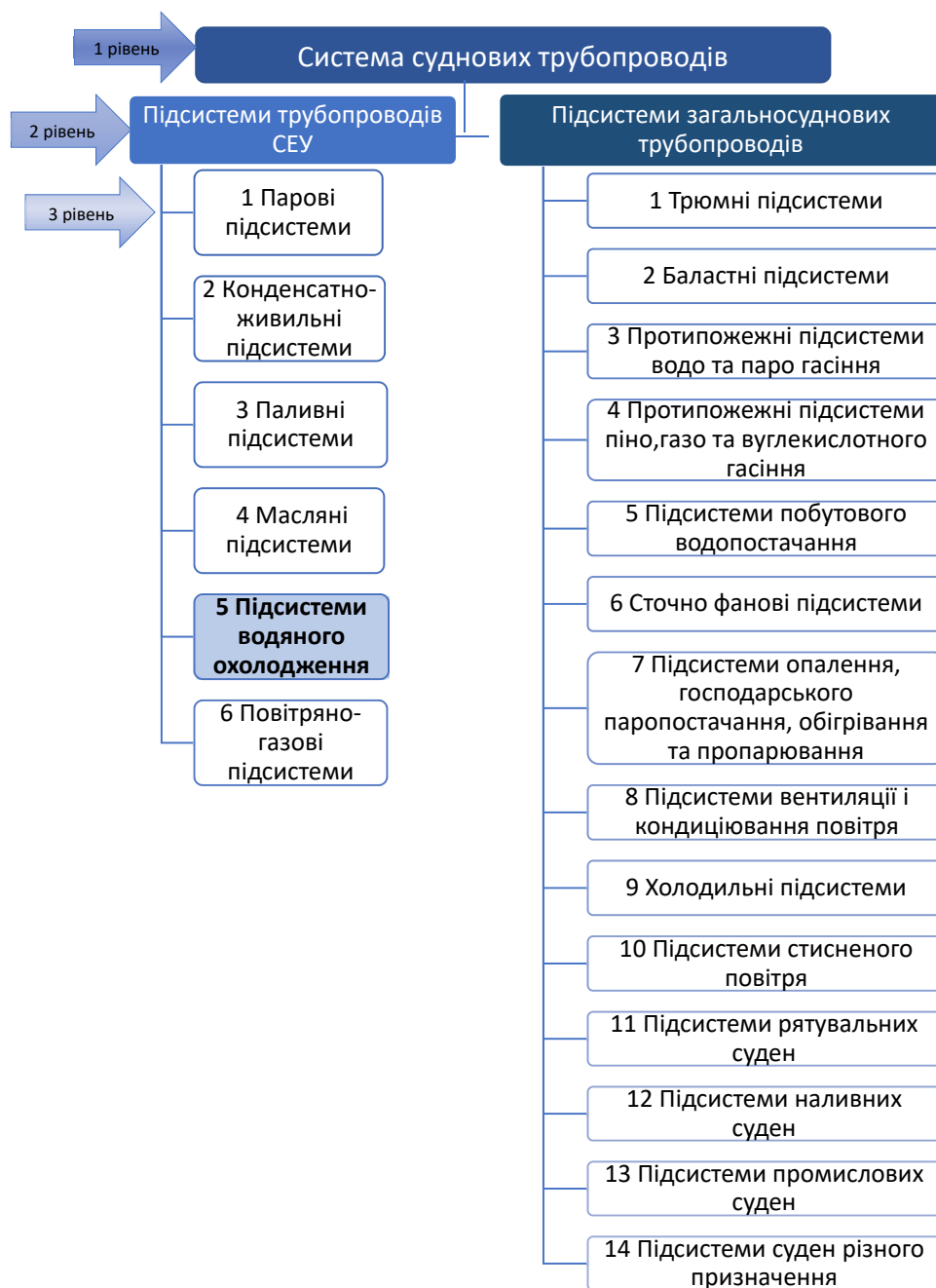


Рис. 1. структурна схема системи суднових трубопроводів

частоту обертання основного насоса; потужність, що підводяться до гідроприводу; корисну потужність на вихідних ланках.

*Конструкція стенду.* Конструктивно стенд виконаний у вигляді єдиного модуля з двостороннім базисом. На обох базисах стенду наведено схеми гідравлічні принципів відповідних підсистем: «Гідравліка» і «Гідромашини і гідроприводи». На бічній поверхні стенду розташовані загальна гідравлічна принципова

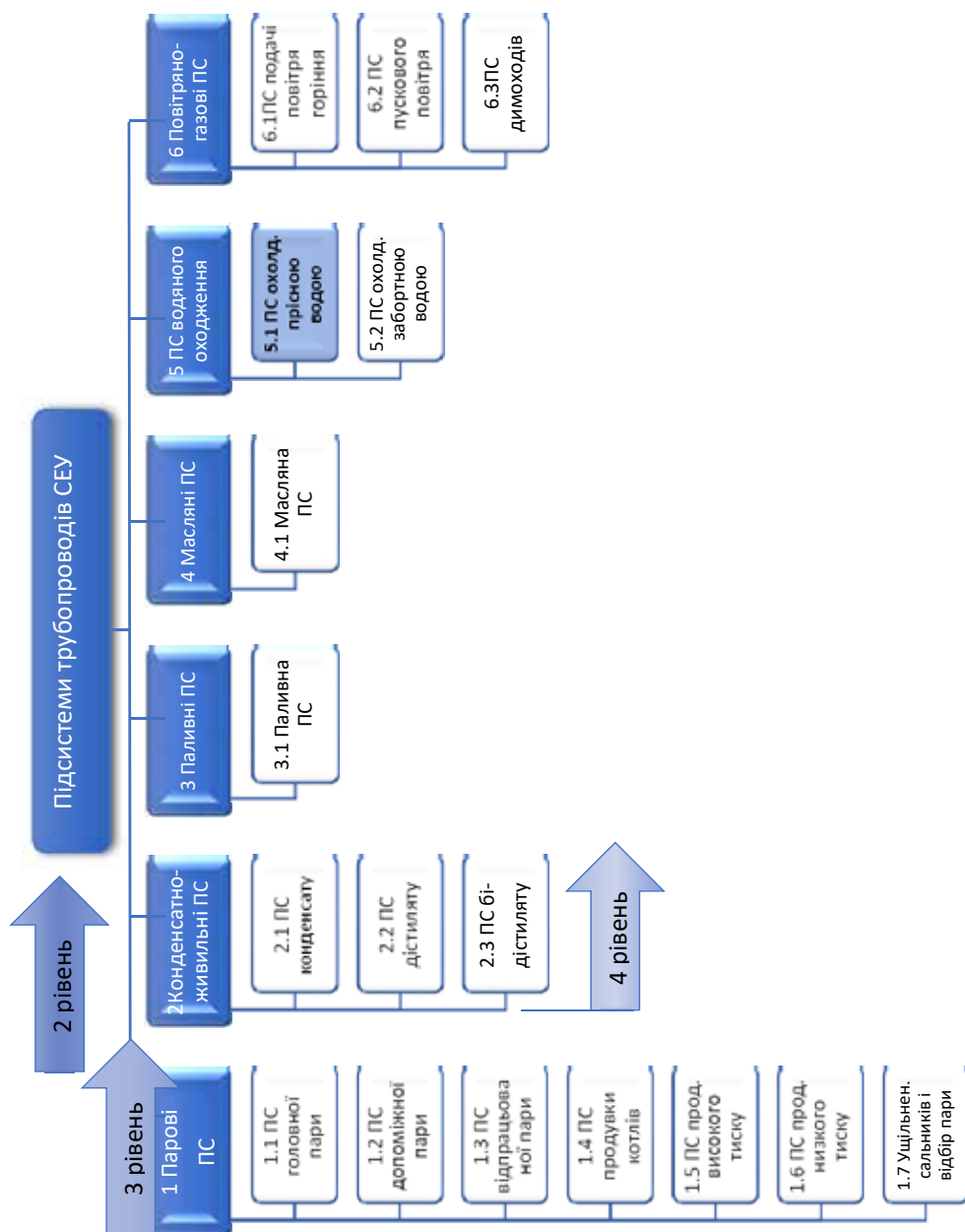


Рис. 2. Структурна схема підсистеми трубопроводів СЕУ





Рис. 6. Структурно-функціональна схема парової підсистеми системи суднових трубопроводів СЕУ

схема стенду, вимикачі електроживлення стенду з індикаторами включення фаз, та запобіжники.

*Технічні характеристики стенду.* Розподіл робочої рідини від основного насоса за базами стенду здійснюється за допомогою розподільника з ручним керуванням **Р1**. Напряга живлення 380 В, частота 50 Гц, напряга живлення електромагнітів гідро розподільників – 24 В (постійний струм). Напряга на кінцевих вимикачах **КВ1 і КВ2** – 12 В. Номінальна потужність стенду – 4,4 кВт.

В експерименті було досліджено трубопровід **abc** з встановленим у ньому дроселем **ДР1**. Конструктивні параметри трубопроводу: внутрішній діаметр – 8 мм, діаметр отвору дроселя **ДР1** – 3мм, довжини: **аб** = 450 мм, **bc** = 100 мм. На рис. 4 зліва зображено фронтальний вигляд лабораторного стенду, справа зображені курсанти Дунайського інститут Національного університету «Одеська морська академія» в процесі дослідження.

**Методика дослідження**, розроблена авторами, містить наступні кроки.

- Крок 1.* Провести зі здобувачами освіти первинний інструктаж з техніки безпеки при роботі з обладнанням з напругою живлення 380 В;
- Крок 2.* Увімкнути рукоятку розподільника **Р1** до положення I (верхнє);
- Крок 3.* Увімкнути включити електричне живлення стенду;
- Крок 4.* Увімкнути електродвигун **М1** (кнопка «Пуск»);
- Крок 5.* Увімкнути розподільник **Р2** тумблером до положення «Вкл»;
- Крок 6.* Дати можливість попрацювати стенду протягом 5 – 6 хвилин;



*Рис. 4. Зовнішній вигляд лабораторного стенду, та курсанти в процесі дослідження*

Крок 7. За допомогою електронного секундоміра виміряти час проходження певного обсягу робочої рідини через трубопровід **abc**. За допомогою витратоміру виміряти обсяг робочої рідини. За допомогою термометра виміряти температуру робочої рідини. Отримані дані занести в таблицю 1.

Крок 8. Вимірювання повторити не менше 10 разів при різних обсягах витратах рідини. Обсяги витрат змінюються за допомогою регулятора витрат **PP1**. Поворот маховика за годинниковою стрілкою супроводжується збільшенням витрати рідини. У кожному вимірюванні необхідно фіксувати температуру робочої рідини. Дані вимірювань занести в таблицю 1.

Крок 9. Після проведення вимірювань відключити живлення секундоміру, вимкнути електродвигун і живлення стенду.

Крок 10. Обчислити витрату рідини за 1 сек по формулі:  $Q=V/t$  (л/сек).

Крок 11. Перевести витрату рідини  $Q$  з л/сек в  $Q_{м\ куб}$  в м<sup>3</sup>/сек.

Крок 12. Визначити швидкість руху рідини в м/сек відношенням об'ємної витрати рідини  $Q_{м\ куб}$  до площі перерізу потоку  $S$ :  $w = Q_{м\ куб} / S$ , де  $S=\pi d^2/4$ ,  $d$  – внутрішній діаметр труби.  $w = 4 Q_{м\ куб} / \pi d^2$  (м/сек).

Крок 13. Обчислити коефіцієнт кінематичної в'язкості  $\nu$  за формулою  $\nu = \mu/\rho$ .

Крок 14. Обчислити число Рейнольдса:  $Re = w\rho/\mu$ . З урахуванням коефіцієнту кінематичної в'язкості  $\nu = \mu/\rho$  число Рейнольдса обчислюється  $Re = wd/\nu$ .

Крок 15. Визначити динаміку зміни режиму напірної течії рідини у прямих гладких циліндричних трубах. Теоретично для руху води у прямих гладких циліндричних трубах напірних потоків встановлено наступні межі числа Рейнольдса: 1)  $Re \leq 2320$  – стійкий ламінарний режим; 2)  $Re \geq 10000$  – стійкий турбулентний режим; 3)  $2320 \leq Re \leq 10000$  – перехідний режим, нестійкий ламінарний режим.

Таблиця 1

Експериментальні дані та розрахункові значення

№ п/п	Внутрішній діаметр труби $d=8$ мм Початкова температура $t_{ск} = 28$ °С						
	Температура $t$ °С	Час $t$ (сек)	Витрата $V$ в л за час $t$	Витрата $Q$ в л за 1 сек	Витрата $Q$ в м <sup>3</sup> за 1 сек	Швидкість $w$ (м/сек)	$Re = wd/\nu$
1	28	128	3062	0,016	1,56E-05	0,311	2 787,463
2	29	122	3064	0,016	1,64E-05	0,326	2 924,551
3	30	69	3066	0,029	2,90E-05	0,577	5 170,946
4	30	52	3068	0,038	3,85E-05	0,766	6 861,447
5	31	28	3070	0,071	7,14E-05	1,422	12 742,687
6	31	20	3072	0,100	1,00E-04	1,990	17 839,762
7	31	16	3074	0,125	1,25E-04	2,488	22 299,703
8	31	14	3076	0,143	1,43E-04	2,843	25 485,375
9	31	13	3078	0,154	1,54E-04	3,062	27 445,788
10	31	10	3080	0,200	2,00E-04	3,981	35 679,525

Довідкові величини, використані в розрахунках  
Динамічний коефіцієнт в'язкості води  $\mu = 8,90 \cdot 10^{-4}$  Па·с при  $t = 25$  °С  
Щільність води при  $t=25$  °С  $\rho = 997,1$  кг/м<sup>3</sup>

**Розрахунки, візуалізація та аналіз отриманих результатів.** Розроблена методика була використана під час проведення експерименту курсантами Дунайського інститут Національного університету «Одеська морська академія». В таблиці 1 показані отримані експериментальні дані, та значення фізичних величин, розраховані за допомогою табличного процесора MS Excel.

Розраховані значення виділені курсивним шрифтом. Експериментальна залежність числа Рейнольдса від швидкості течії рідини (рис. 5) графічно відображає динаміку зміни режиму течії рідини в судовому трубопроводі.

На рис. 5 позначено точку зміни режиму течії рідини зі стійкого *ламінарного* режиму на стійкий *турбулентний*. У загальному вигляді крива залежності найбільш наближена до лінійної. Однак на графіку чітко видно поділ кривої на три ділянки із зростаючим кутом нахилу до осі абсцис. Після значення швидкості  $w > 3,06$  м/сек число Рейнольдса стрімко зростає. Турбулентні вихори рідини призводять до виникнення явища *гідродинамічної кавітації* – утворення всередині рідини кавітаційних бульбашок – порожнин, заповнених газом, парою або їх сумішшю. Під впливом різниці тиску в частинах рідини кавітаційні бульбашки руйнуються, і створюють ударну хвилю на стінки трубопроводу. Ці процеси призводять до кавітаційної корозії, яка викликає руйнування поверхонь труб, зношення та вібрацію трубопроводів та трубопровідної арматури, зменшення ККД та ефективності роботи насосів, турбін тощо. Для усунення негативного впливу кавітації потрібно уникати турбулентних потоків, та застосовувати стійкі до корозії матеріали.

**Висновки.** В роботі описані проблеми надійної експлуатації судових трубопроводів внаслідок агресивного впливу різновидів судового палива, та турбулентного режиму течії рідини, що призводять до руйнування поверхонь труб, зношення та вібрації трубопроводів та арматури. Обґрунтовано актуальність

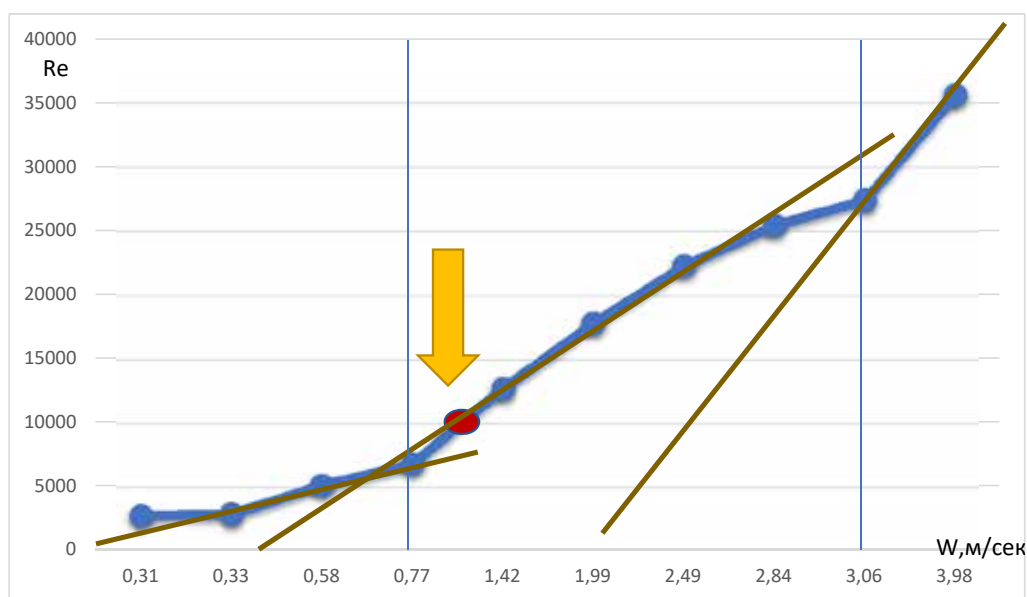


Рис. 5. Залежність числа Рейнольдса від швидкості течії рідини

досліджень фізичних процесів в області молекулярної фізики та механіки суцільних середовищ здобувачами вищої освіти у сфері морської інженерії.

Встановлена найпоширеніша проблема суднових трубопроводів – розгерметизація, яка відбувається за низки причин: руйнування внутрішніх поверхонь труб, зношення та вібрацію трубопроводів та трубопровідної арматури, понаднормове збільшення тиску, замерзання рідини в трубопроводі при низьких температурах, корозія труб та арматури внаслідок впливу агресивних середовищ при використанні різновидів судового палива, таких як метанол, водень, біодизель. Описані проблеми транспортування та зберігання цих видів палива, та їх негативний вплив на судові трубопроводи.

З використанням системно-структурного підходу розроблені багаторівневі класифікаційні структурна та функціональна схеми системи суднових трубопроводів.

Розроблена покрокова методика дослідження руху рідини. За цією методикою на лабораторному стенді НТЦ-11.38 «ГІДРАВЛІКА, ГІДРОМАШИНИ І ГІДРОПРИВОДИ» курсантами Дунайського інститут Національного університету «Одеська морська академія» проведено дослідження та отримані експериментальні дані. Розрахунки та візуалізація результатів виконані у табличному процесорі MS Excel.

Досліджено динаміку зміни швидкості течії рідини та числа Рейнольдса. Визначено точку зміни режиму течії рідини зі стійкого ламінарного режиму на стійкий турбулентний. Встановлено, що при значенні швидкості  $w > 3,06$  м/сек число Рейнольдса стрімко зростає. Турбулентні вихори рідини призводять до виникнення явища гідродинамічної кавітації та кавітаційної корозії, яка викликає руйнування внутрішніх поверхонь труб, викликає зношення та вібрацію трубопроводів та трубопровідної арматури, зменшення ККД та ефективності роботи насосів, турбін тощо. Для усунення негативного впливу гідродинамічної кавітації потрібно уникати турбулентних потоків та застосовувати в трубопроводах стійкі до корозії матеріали.

В роботі застосований інтегрований підхід до вивчення освітнього компоненту «Фізика», який поєднує теоретичні знання та практичні навички в області фізики, методології дослідження, та інформаційних технологій. Наразі цей підхід є актуальним, і широко впроваджується в освітніх процесах багатьох країн світу.

Залучення курсантів до науково–дослідної роботи дало можливість розвинути наступні компетентності: розуміння мети роботи та визначення критеріїв її досягнення, пошук необхідної інформації та найбільш ефективного способу досягнення мети, практичні навички класифікації сутностей, навички роботи з лабораторним обладнанням, здатність застосовувати аналітичні та експериментальні методи для вирішення складних задач, та інформаційні технології для обробки даних, управління процесом виконання роботи, здатність аналізувати результати, формулювати та обґрунтовувати висновки.

Подальші дослідження будуть спрямовані на поглиблення інтегрованого підходу до вивчення освітнього компоненту «Фізика» шляхом моделювання фізичних процесів та застосування сучасних мов програмування для обробки експериментальних даних.

### ЛІТЕРАТУРА

1. Курушин М., Непомнящий Н. Великая книга катастроф. Ч.1. Москва.: ОЛМА Медиа Групп, , 2007. 255 с
2. Вікіпедія. Катастрофа пароплава «Адмірал Нахімов». Вільна енциклопедія. URL: [https://uk.wikipedia.org/wiki/Катастрофа\\_пароплава\\_«Адмірал\\_Нахімов»](https://uk.wikipedia.org/wiki/Катастрофа_пароплава_«Адмірал_Нахімов») (дата звернення 01.02.2023)
3. Овчинников И. Н. Судовые системы и трубопроводы (устройство, изготовление и монтаж). Л., «Судостроение», 1988. 296 стр.
4. Яремчук С.О., Павлова О. А. Аналіз особливостей водневих суднових паливних систем. Сучасні підходи до високоефективного використання засобів транспорту: матеріали XI Міжн. наук.-практ. конф. Ізмаїл, 3-4 грудня 2020 р. Запоріжжя : АА Тандем, 2020. С. 94–99.
5. Яремчук С.О., Д. В Воронцов. Альтернативне паливо на судні: аналіз особливостей метанолу. Сучасні підходи до високоефективного використання засобів транспорту: матеріали XI Міжн. наук.-практ. конф. Ізмаїл, 3–4 грудня 2020 р. Запоріжжя : АА Тандем, 2020. С. 75–79.
6. Дмитрієв П.Р. Аналіз техніко-експлуатаційних характеристик та впливу біопалива на суднову енергетичну установку. Матеріали XI Всеукраїнської студентської наукової конференції «Сучасні проблеми морського транспорту та безпека мореплавства», м. Херсон, 18 листопада 2021 року. – Херсон : Видавництво ХДМА, 2021. С. 180–183.
7. Михайленко В.І., Білоус В.М., Поповський Ю.М. Загальна фізика: Навчальний посібник. Друге видання, перероблене та доповнене – Одеса: ВидавІнформ ОНМА, 2012. 475 с.
8. Шерстнев Н.В. Обслуживание и ремонт судовых трубопроводов, арматуры и фильтров. Учебное пособие. – Москва: Инфра-М. 2021 ; 372 с.
9. Катренко А. В. Системний аналіз : підручник / за ред. В. В. Пасічника. Львів : Новий Світ-2000, 2011. 396 с.

### REFERENCES

1. Kurushin, M., Nepomnyashij, N. (2007). The Great Book of Disasters [Velikaya kniga katastrof]. Part 1. Moskva: OLMA Media Grupp, p. 255. [in Russian].
2. Wikipedia. Free encyclopedia (2023). "Admiral Nakhimov" steamer disaster [Katastrofa paroplava «Admiral Nahimov»]. Retrieved from: [https://uk.wikipedia.org/wiki/Katastrofa\\_paroplava\\_«Admiral\\_Nahimov»](https://uk.wikipedia.org/wiki/Katastrofa_paroplava_«Admiral_Nahimov») [in Ukrainian].
3. Ovchinnikov I. N. (1988) Ship systems and pipelines (device, preparation and installation) [Sudovye sistemy i truboprovody (ustrojstvo, izgotovlenie i montazh)]. L., «Sudostroenie», p. 296. [in Russian].
4. Yaremchuk, S.O., Pavlova, O.A. (2020). Analysis of the features of hydrogen marine fuel systems [Analiz osoblyvostej vodnevyyh sudnovyyh palivnyh system]. Materials of the XI International Scientific and

- Practical Conference "Modern approaches to high-efficiency use of transport means". Izmail, December 3-4. Zaporizhzhya: AA Tandem, P. 94–99. [in Ukrainian].
5. Yaremchuk, S.O., Voroncov, D.V. (2020). Alternative fuel on the ship: analysis of methanol features [Alternatyvne palyvo na sudni: analiz osoblyvostej metanolu]. Materials of the XI International Scientific and Practical Conference "Modern approaches to high-efficiency use of transport means". Izmail, December 3–4. Zaporizhzhya: AA Tandem, P. 75–79. [in Ukrainian].
  6. Dmitriyev, P.R. (2021) Analysis of technical and operational characteristics and effect of biofuels on the ship's power plant [Analiz tehniko-eksploatacijnyh harakterystik ta vplivu biopalyva na sudnovu energetychnu ustanovku]. Materials of the XI All-Ukrainian Student Scientific Conference "Modern Problems of Maritime Transport and Maritime Safety," Kherson, November 18. Kherson: Publishing House KHDMA, P. 180–183. [in Ukrainian].
  7. Mihajlenko, V.I., Bilous, V.M., Popovskij, Yu.M. (2012). General Physics: Tutorial [Zagalna fizyka: Navchalnyj posibnyk]. Second edition, revised and supplemented – Odesa: VydavInform ONMA, 475 p. [in Ukrainian].
  8. Sherstnev, N.V. (2021) Servicing and repair of ship pipelines, valves and filters. Educational support [Obsluzhivanie i remont sudovyh truboprovodov, armatury i filtrov. Uchebnoe posobie] – Moskva: Infra-M, 372 p. [in Russian].
  9. Katrenko, A. V. (2011). System analysis: textbook [Systemnyi analiz: pidruchnyk] / ed. by V. V. Pasichnyk. Lviv: Novyi Svit-2000, 396 p. [in Ukrainian]