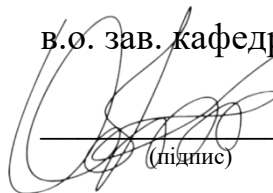


МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ КОРАБЛЕБУДУВАННЯ  
імені адмірала Макарова

Навчально-науковий інститут автоматики та електротехніки  
кафедра суднових електроенергетичних систем

Рекомендовано до захисту

в.о. зав. кафедри СЕЕС



Обрубов А.В.

(прізвище та ініціали)

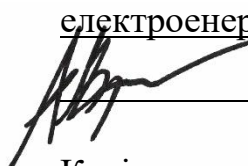
«15» грудня 2025 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття ступеня вищої освіти «магістр»

на тему ДОСЛІДЖЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ  
СИЛОВОЇ ДІЇ ПОСТІЙНОГО ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО  
ПОЛЯ НА МОРСЬКУ ВОДУ

Виконав: студент бкурсу, групи 6365м  
спеціальності 141. Електроенергетика,  
електротехніка та електромеханіка  
освітньої програми: Системи генерування  
електроенергії та електропостачання

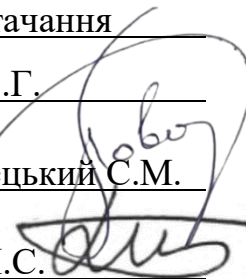


Авраменко В.Г.

(прізвище та ініціали)

Керівник: к.т.н., доц. Новогрецький С.М.  
(прізвище та ініціали)

Рецензент: к.т.н., доц. Білюк І.С.  
(прізвище та ініціали)



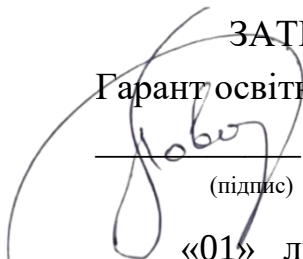
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ КОРАБЛЕБУДУВАННЯ ІМЕНІ  
адмірала Макарова

Навчально-науковий інститут автоматики та електротехніки  
кафедра суднових електроенергетичних систем

Ступень вищої освіти: магістр

Спеціальність 141. Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка  
(шифр і назва спеціальності)

Освітня програма Системи генерування електроенергії та електропостачання  
(назва освітньої програми)

ЗАТВЕРДЖУЮ  
Гарант освітньої програми  
 Новогрецький С.М.  
(підпис) (прізвище та ініціали)  
«01» лютого 2025 р.

ЗАВДАННЯ  
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ  
на здобуття ступеня вищої освіти «магістр»

Студенту Авраменку Володимирі Геннадійовичу  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Дослідження енергетичної ефективності силової дії постійного електромагнітного поля на морську воду

науковий керівник Новогрецький Сергій Миколайович, канд.техн.наук, доцент  
затверджено наказом по університету № 1217-уч. від «14» жовтня 2025 року

2. Строк подання студентом роботи «15» грудня 2025 р.

3. Об'єкт дослідження електромагнітне поле в морській воді

4. Предмет дослідження магнітогідродинамічний ефект в морській воді.

5. Перелік задач, які потрібно вирішити розробити конструкцію, провести аналіз магнітної системи, розробити математичну модель для визначення швидкості потоку морської води та максимального коефіцієнта корисної дії в магнітогідродинамічному каналі.

7. Перелік графічного матеріалу: розподіл магнітної індукції в магнітних системах при різних геометричних параметрах, залежності магнітної індукції від довжини магнітогідродинамічного каналу, креслення магнітної системи з магнітопроводом без повітряних зазорів відносно аксіальних поверхонь магнітів та відстанню між магнітами 0,025 м, геометрична модель для розрахунку магнітогідродинамічного каналу, залежності потужності, швидкості, напору, ККД води від відстані між магнітами, моделі для дослідження магнітогідродинамічного ефекту в морській воді.

8. Дата видачі завдання « 01 » лютого 2025 р.

#### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

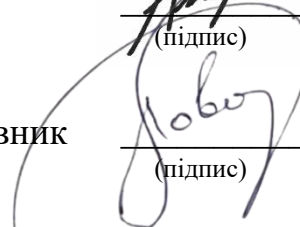
| № з/п | Назва етапу роботи          | Строк виконання етапів роботи | Примітка |
|-------|-----------------------------|-------------------------------|----------|
| 1     | Закінчити розділ 1          | березень 2025 р               | Виконано |
| 2     | Закінчити розділ 2          | липень 2025 р                 | Виконано |
| 3     | Закінчити розділ 3          | жовтень 2025 р                | Виконано |
| 4     | Закінчити оформлення роботи | грудень 2025 р                | Виконано |

Студент

  
(підпис)

Авраменко В.Г.  
(прізвище та ініціали)

Науковий керівник

  
(підпис)

Новогрецький СМ.  
(прізвище та ініціали)

## АНОТАЦІЯ

В кваліфікаційній магістерській роботі розглянуті питання магнітогідродинамічного ефекту в морській воді. А саме розглянуті типи магнітогідродинамічних перетворювачів з принциповими схемами та описом їх роботи. Розглянуто три основні магнітні системи для використання у якості магнітогідродинамічного каналу. Розглянуто два лабораторні стенди для дослідження магнітогідродинамічного ефекту. В одному з них досліджується тиск в каналі, а в другому – опріснення води. Зображена математична модель магнітогідродинамічного каналу, та визначена залежність швидкості потоку морської води в каналі від відстані між магнітами. Приведений опис впливу електричного струму на морську воду. Всі зроблені в роботі висновки підкріплені відповідними аналітичними розрахунками та графіками.

Ключові слова: магнітогідродинамічний перетворювач, магнітна система, електричний струм, морська вода

## ABSTRACT

The qualification master's thesis considers the issues of the magnetohydrodynamic effect in seawater. Namely, the types of magnetohydrodynamic converters with schematic diagrams and a description of their operation are considered. Three main magnetic systems for use as a magnetohydrodynamic channel are considered. Two laboratory stands for studying the magnetohydrodynamic effect are considered. In one of them, the pressure in the channel is studied, and in the second, water desalination. A mathematical model of the magnetohydrodynamic channel is depicted, and the dependence of the seawater flow velocity in the channel on the distance between the magnets is determined. The effect of electric current on seawater is described. All conclusions made in the work are supported by relevant analytical calculations and graphs.

Keywords: magnetohydrodynamic converter, magnetic system, electric current, seawater

## ЗМІСТ

|                                                                                        |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| АНОТАЦІЯ.....                                                                          | 4  |
| ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ.....                                                         | 7  |
| ВСТУП .....                                                                            | 8  |
| РОЗДІЛ 1. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО                                                       |    |
| МАГНІТОГІДРОДИНАМІЧНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ.....                                               | 10 |
| 1.1. Простий кондукційний МГД-перетворювач .....                                       | 10 |
| 1.2. Простий індукційний МГД-перетворювач.....                                         | 11 |
| 1.3. Магнітогідродинамічний двигун.....                                                | 12 |
| 1.4. МГД-генератори.....                                                               | 13 |
| 1.5. МГД-насос для атомних електростанцій.....                                         | 16 |
| 1.6. Принцип пристрою і дії МГД-рушіїв.....                                            | 21 |
| 1.7. Комплектація агрегатів електромагнітної<br>суднової пропульсивної установки ..... | 31 |
| 1.8. Магнітогідродинамічний двигун для підводних човнів та суден .....                 | 33 |
| РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ МАГНІТОГІДРОДИНАМІЧНИХ                                                |    |
| ВЛАСТИВОСТЕЙ МОРСЬКОЇ ВОДИ.....                                                        | 39 |
| 2.1. Електромагнітні властивості морської води .....                                   | 39 |
| 2.2. Програмне забезпечення для аналізу магнітного поля .....                          | 46 |
| 2.3. Аналіз магнітних систем, які можна<br>використати для МГД-пристроїв.....          | 51 |
| 2.4. Застосування магнітогідродинамічної установки .....                               | 69 |
| РОЗДІЛ 3. ВПЛИВ ЕЛЕКТРИЧНОГО СТРУМУ                                                    |    |
| НА МОРСЬКУ ВОДУ .....                                                                  | 71 |
| 3.1. Електрохімічні процеси та їх організація.....                                     | 71 |
| 3.2. Хімічний склад морської води.....                                                 | 76 |
| 3.3. Електроліз морської води.....                                                     | 79 |
| 3.3.1. Оновлена технологія електролізу морської води .....                             | 82 |

|                                             |    |
|---------------------------------------------|----|
| 3.3.2. «Ударний» електроліз .....           | 83 |
| 3.4. Електродіаліз морської води .....      | 84 |
| 3.5. Електроосмотичне опріснення води ..... | 89 |
| ВИСНОВКИ.....                               | 91 |
| СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....                      | 92 |

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

МГД – магнітогідродинамічний

ККД – коефіцієнт корисної дії

ЕРС – електрорушійна сила

РТ – робоче тіло

## ВСТУП

Магнітна гідродинаміка – наука про рух електропровідних газів і рідин у взаємодії з магнітним полем. При русі електропровідного середовища (газу, рідини), що знаходиться в магнітному полі, в ньому індукуються електричні поля і струми, на які діє магнітне поле і які самі можуть вплинути на магнітне поле.

Заповітною мрією кораблебудівників є створення судна, що має велику швидкість ходу і безшумний рух при можливо високому значенні його повного пропульсивного коефіцієнта.

Одним з основних напрямків вирішення всього комплексу завдань є розробка принципово нової суднової енергетичної установки з безгвинтовим МГД-рушієм. На відміну від звичайних такі установки об'єднують функції гребного електродвигуна і гребного гвинта.

Незважаючи на простоту ідеї, її технічна реалізація до останнього часу не знаходила свого рішення.

Причина такого стану справ криється в тому, що створення установки з постійними магнітами дає можливість досягти значень ККД МГД-рушія лише не більше кількох відсотків. Саме це питання необхідно дослідити.

**Мета і задачі досліджень.** Мета роботи – розробити конструкцію магнітогідродинамічного каналу та розрахувати основні параметри.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися наступні задачі:

- розробити конструкцію каналу;
- провести аналіз магнітної системи та визначити інтенсивність магнітного поля в залежності від геометрії каналу;
- розробити математичну модель для визначення енергетичних характеристик магнітогідродинамічного каналу із морською водою в залежності від геометрії каналу, інтенсивностей магнітного та електричного полів;
- розробити експериментальні стенди для вивчення магнітогідродинамічного ефекту в морській воді
- визначити область використання в практичній сфері отриманих результатів.

**Об'єкт дослідження** – електромагнітне поле в морській воді.

**Предмет дослідження** – магнітогідродинамічний ефект в морській воді.

**Методи дослідження.** При виконанні роботи було проведено моделювання в програмному середовищі MathCAD для визначення тиску в каналі та швидкості потоку морської води, проведено моделювання магнітних систем за допомогою програмного пакету ANSYS Maxwell, використані загальні положення гідродинаміки та електротехніки для визначення співвідношень між характеристиками потоку води та електромагнітного поля.

**Наукова новизна отриманих результатів.** У роботі отримані наступні наукові результати:

- 1) запропонована математична модель магнітної системи для визначення енергетичних параметрів магнітогідродинамічного каналу в залежності від геометрії каналу, інтенсивностей магнітного та електричного полів;
- 2) запропонована конструкція лабораторного стенду для наочного вивчення магнітогідродинамічного ефекту в морській воді.

## РОЗДІЛ 1. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО МАГНІТОГІДРОДИНАМІЧНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ

Магнітна гідродинаміка (МГД) представляє собою область науки, що вивчає закономірності руху суцільних рідких і газоподібних електропровідних середовищ в магнітному полі. Такими середовищами є рідкі метали, електроліти та іонізований газ, який називається також плазмою.

При русі провідного середовища в зовнішньому магнітному полі в ній виникають електричні струми, які створюють власне магнітне поле. В результаті в провідному середовищі утвориться деяке результуюче магнітне поле. При взаємодії струмів з магнітним полем в провідному середовищі з'являються електромагнітні сили. Ці сили в свою чергу впливають як на рух середовища в цілому, так і на характер її руху в окремих її областях. В результаті виходить складна взаємодія між середовищем і магнітним полем. Аналогічні явища виникають також при зміні зовнішніх магнітних полів в часі. Вивчення цих явищ і властивих їм закономірностей і становить предмет магнітної гідродинаміки.

### **1.1. Простий кондукційний МГД-перетворювач**

На рисунку 1.1 наведено ескіз найпростішого кондукційного МГД-перетворювача з суцільними електродами, який може працювати в режимі двигуна (насоса), генератора і витратоміра.

Верхня 1 і нижня 2 стінки каналу – провідні електроди, бічні стінки 3 – непровідні. Магнітна система, що складається з котушок 4, створює в каналі поперечне магнітне поле  $B$ . Якщо на електроди 1, 2 подати напругу від зовнішнього джерела, то в провідному середовищі, що заповнює канал, потече струм. Цей струм, взаємодіючи з магнітним полем, створить електромагнітну силу, яка переміщує робоче тіло РТ вздовж осі каналу. Пристрій працює в режимі двигуна (насоса).

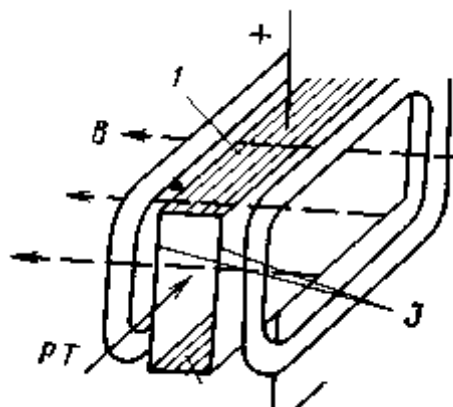


Рисунок 1.1 – Кондукційний МГД-перетворювач з суцільними електродами

Нехай тепер електроди замкнуті на пасивне електричне коло з омичним навантаженням, а робоче тіло рухається в каналі за рахунок зовнішнього впливу. Тоді на електродах з'являється ЕРС, подібна до тієї, яка виникає в електромеханічному генераторі при русі провідника в поперечному магнітному полі. Під дією ЕРС через навантаження тече електричний струм і канал працює в генераторному режимі. Такий МГДГ прийнято називати фарадеевським генератором із суцільними електродами.

При розімкнутому зовнішньому колі ЕРС пропорційна швидкості робочого тіла і пристрій може працювати витратоміром.

## 1.2. Простий індукційний МГД-перетворювач

В індукційних МГД-перетворювачах обмін енергією між рухомим робочим тілом і зовнішнім колом здійснюється за допомогою електромагнітного поля аналогічного тому, як в найпростішій моделі індукційного електромагнітного перетворювача. Робоче тіло (рисунок 1.2) рухається в каналі, електрично непов'язаним з зовнішнім колом; навколо каналу розміщується розподілена багатозафна (зазвичай трифафна) обмотка 2. Ця обмотка створює рухоме магнітне поле, яке взаємодіє з провідним робочим тілом так само, як в асинхронній машині обертове магнітне поле взаємодіє з короткозамкненими провідниками ротора. Якщо швидкість робочого середовища менше швидкості магнітного поля, середовище прискорюється і канал працює в руховому (насосному) режимі. Якщо

ж робоче середовище за допомогою зовнішнього впливу приводиться в рух зі швидкістю, більшою швидкості поля, вона гальмується полем і частина її енергії передається в обмотку у вигляді активної електричної потужності – канал працює в генераторному режимі.

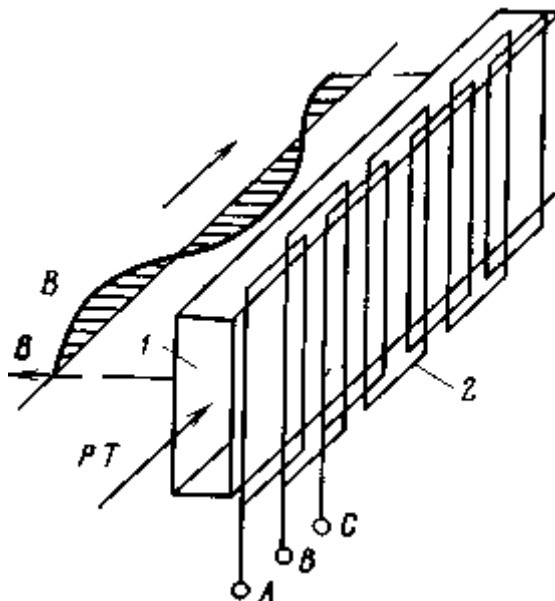


Рисунок 1.2 – Простий індукційний МГД-перетворювач

Електромагнітний вплив робочого середовища на обмотку в індукційному каналі буде тим більше, чим сильніше відрізняються швидкості поля і середовища. Тому за ступенем цього впливу можна знаходити швидкість робочого тіла і використовувати індукційний канал в якості витратоміра.

### 1.3. Магнітогідродинамічний двигун

Магнітогідродинамічний (МГД) двигун – електричний двигун, в якому робоче тіло знаходиться в стані плазми і розганяється за допомогою впливу на нього електромагнітного поля. Такий перетворювач є зворотним МГД-генератором: перетворює електромагнітну енергію в механічну і теплову енергію руху провідної речовини (рідини або плазми).

Сама ідея магнітогідродинамічного перетворення енергії виникла ще в XIX століття і була висловлена М. Фарадеєм. Але цей напрямок розвивався в основному по лінії створення МГД-генераторів для електростанцій нового типу. Реальні

експериментальні зразки МГД-двигунів з'явилися в другій половині XX століття. Основна ідея МГД-двигуна полягає в тому, що при протіканні постійного електричного струму через провідник, розташований поперек силових ліній магнітного поля, на цей провідник діє сила Лоренца. При цьому питомий імпульс такого двигуна досягає 15-100 км/с.

#### **1.4. МГД-генератори**

Щоб якнайповніше розкрити тему МГД-пристроїв необхідно також розглянути загальні відомості про МГД-генератори.

Перший вузол пристрою називається каналом, по якому рухається робоче тіло. В даний час в МГД-генераторах в якості основного середовища застосовується здебільшого плазма. Наступний вузол представляє собою систему магнітів, які відповідають за створення магнітного поля і електродів для відведення тієї енергії, яка буде отримана в ході робочого процесу. При цьому джерела можуть бути різними. В системі можна застосовувати як електромагніти, так і постійні магніти.

Далі газ проводить електричний струм і нагрівається до температури термічної іонізації, яка становить приблизно 10 тисяч Кельвінів. Після досягнення такої температури її неодмінно потрібно знизити. Планка температури падає до 2,2-2,7 тисячі Кельвінів за рахунок того, що в робоче середовище додаються спеціальні присадки з лужними металами. В іншому випадку плазма не є в достатній мірі ефективною, тому як величина її електропровідності стає значно меншою, ніж у тій же воді.

Інші вузли, складові конструкцію магнітогідродинамічної генератора, найкраще перерахувати разом з описом функціональних процесів в тій послідовності, в якій вони відбуваються. Камера згоряння приймає паливо. Також додаються окислювачі і різні присадки. Паливо починає горіти, що дозволяє утворитися газу в якості продукту згоряння. Далі задіюється сопло генератора. Через нього газ проходить, після чого вони розширюються, а їх швидкість зростає до швидкості звуку. Дія доходить до камери, яка пропускає через себе магнітне

поле. На її стінах знаходяться спеціальні електроди. Саме сюди надходять гази на даному етапі циклу. Потім робоче тіло під впливом заряджених частинок відхиляється від своєї первинної траєкторії. Новий напрямок знаходиться в точності там, де розташовуються електроди. Завершальний етап – відбувається утворення електричного струму між електродами. На цьому цикл закінчується.

За тривалістю роботи МГД-генератори поділяються на тривалі і короткочасні, а останні – на імпульсні і вибухові. З джерел тепла можна назвати ядерні реактори, теплообмінні пристрої і реактивні двигуни.

Крім того, є також класифікація за типом робочого циклу. Тут підрозділ відбувається лише на два основних типи. Генератори з відкритим циклом мають робоче тіло, змішане з присадками. Відпрацьовані гази йдуть через робочу камеру, де вони в процесі очищаються від домішок і викидаються в атмосферу. У замкнутому циклі робоче тіло потрапляє в теплообмінник і лише після цього надходить в камеру генератора. Далі на продукти згоряння чекає компресор, який і закінчує цикл. Після цього робоче тіло повертається на перший етап в теплообмінник.

Широкого використання таких пристроїв сьогодні спостерігати не доводиться. Проте теоретично існує можливість будувати електростанції з магнітогідродинамічними генераторами. Всього є три допустимих варіації:

- Термоядерні електростанції. У них застосовується безнейтронний цикл з МГД-генератором. В якості палива прийнято використовувати плазму на високих температурах.

- Теплові електростанції. Використовується відкритий тип циклу, а самі установки за конструктивними особливостями є досить простими. Саме цей варіант все ще має перспективи до розвитку.

- Атомні електростанції. Робоче тіло в даному випадку - інертний газ. Він нагрівається в ядерному реакторі по закритому циклу. Також має перспективи до розвитку. Однак можливість застосування залежить від появи ядерних реакторів з температурою робочого тіла вище 2 тисяч Кельвінів.

Актуальність МГД-генераторів залежить від цілого ряду факторів і не вирішених досі проблем. Як приклад можна привести здатність таких пристроїв до вироблення тільки постійного струму, а отже для їх обслуговування необхідно конструювати досить потужні і при тому економічні інвертори. Іншою проблемою є відсутність необхідних матеріалів, які могли б працювати досить тривалий час в умовах розігріву палива до позамежних температур. Те ж саме стосується і електродів, що застосовуються в таких генераторах.

Крім функціонування в основі електростанцій, дані пристрої здатні працювати в спеціальних енергетичних установках, що було б дуже корисно для атомної енергетики. Застосування МГД-генератора допускається і в гіперзвукових авіаційних системах, проте будь-яких зрушень у цій галузі поки що спостерігати не доводиться.

Переваги МГД-генераторів:

- Дуже висока потужність, до декількох МВт на не дуже велику установку.
- У ньому не використовуються обертові деталі, отже, відсутні втрати на тертя.
- Розглянуті генератори є об'ємними машинами в них протікають об'ємні процеси. Зі збільшенням обсягу зменшується роль небажаних поверхневих процесів (забруднення, струмів витоку). У той же час збільшення обсягу, а з ним і потужності генератора практично нічим не обмежена (2 ГВт, і більше), що відповідає тенденції зростання потужності одиничних агрегатів.
- При більш високому ККД МГД-генераторів істотно зменшується викид шкідливих речовин, які зазвичай містяться у відпрацьованих газах.
- Великий успіх у технічному відпрацюванні використання МГД-генераторів для виробництва електричної енергії був досягнутий завдяки комбінації магнітогідродинамічної ступені з котельним агрегатом. В цьому випадку гарячі гази, пройшовши через генератор, не викидаються в трубу, а обігрівають парогенератори ТЕС. Загальний ККД таких електростанцій досягають небувалої величини -65%.

Недоліки МГД-генераторів:

- Необхідність застосування жаростійких матеріалів. Загроза розплавлення. Температура 2000 - 3000 К.
- Генератор виробляє тільки постійний струм. Створення ефективного електричного інвертора для перетворення постійного струму в змінний.
- Середовище в МГД-генераторі з відкритим циклом - хімічно активні продукти згоряння палива. У МГД-генераторі із замкнутим циклом - хоча і хімічно неактивні інертні гази, але дуже хімічно активна домішка (цезій).
- Робоче тіло потрапляє в так званий МГД-канал, де і відбувається виникнення електрорушійної сили. Канал може бути трьох видів. Надійність і тривалість роботи електродів - загальна проблема всіх каналів. При температурі середовища в кілька тисяч градусів електроди дуже недовговічні.
- Незважаючи на те, що потужність пропорційна квадрату індукції магнітного поля, для промислових установок потрібні дуже потужні магнітні системи, набагато потужніші, ніж досліджені.

### **1.5. МГД-насос для атомних електростанцій**

Сучасна техніка часто зустрічається з необхідністю перекачування розплавлених металів. Наприклад, в атомних електростанціях через реактор іноді прокачують ртуть або розплавлений натрій. Перекачувати їх за допомогою звичайних механічних насосів не бажано. Розплавлені метали будуть руйнувати підшипники і просочуватися назовні через вихід вала насоса з корпусу. Крім цього метали в даному випадку радіоактивні, і натрій до того ж горить від контакту з повітрям.

Тут-то і використовують МГД-насоси, в яких роль самого провідника грає рідкий метал, розташований в магнітному полі. Такі насоси абсолютно герметичні й довговічні. У них просто немає чому зношуватися.

Проточна частина насоса, розташована між полюсами магнітів, зроблена у вигляді тонкостінної сплющеної трубки з нержавіючої сталі. По її вузьким

сторонам приварені шини-струмопроводи, на які подається постійний струм силою в сотні ампер (рисунок 1.3).

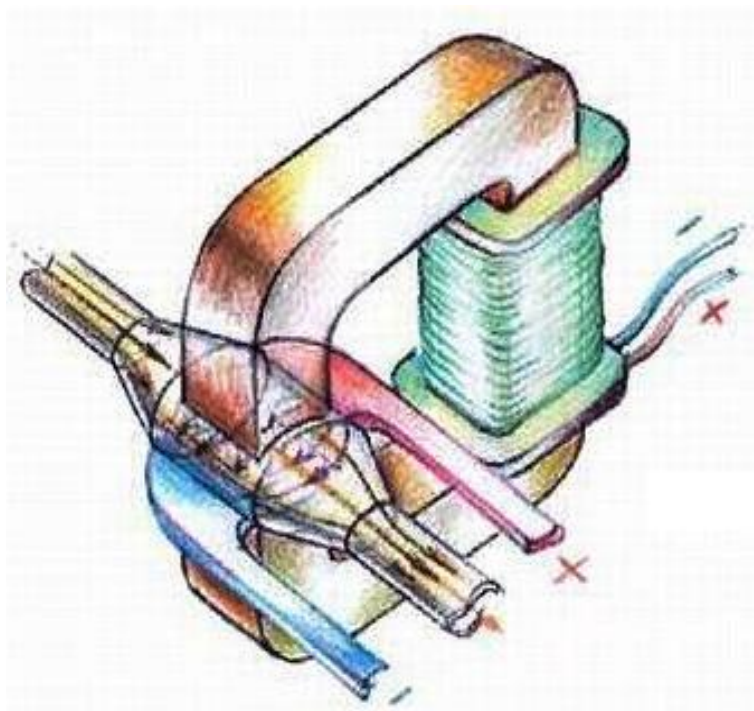


Рисунок 1.3 – МГД-насос

Велика частина електричного струму відразу ж іде через стінку в розплавлений метал з дуже низьким опором і лише незначна частина йде по замкнутому шляху через трубку. Адже якщо насос викидає струмінь рідини, що володіє деякою масою, повинна виникати реактивна сила, спрямована в протилежний бік.

Багатоканальний МГД-насос складається з корпусу у вигляді двох ділянок труб внутрішньої і зовнішньої, що охоплює дванадцять каналів, що звужуються від зовнішньої труби до внутрішньої. Через канали проходить рідкий метал і пропускається струм. Між каналами розташовані постійні магніти, що створюють в каналах магнітний потік. В результаті взаємодії протікаючого через канали струму з потоком в каналах на рідкий метал діє електромагнітна сила, що переміщає рідкий метал в радіальному напрямку. Технічний результат полягає у спрощенні системи підведення струму, що дозволяє спростити конструкцію насоса

і знизити його вартість за рахунок послідовного підключення ділянок каналів до зовнішнього джерела струму (рисунок 1.4, 1.5).

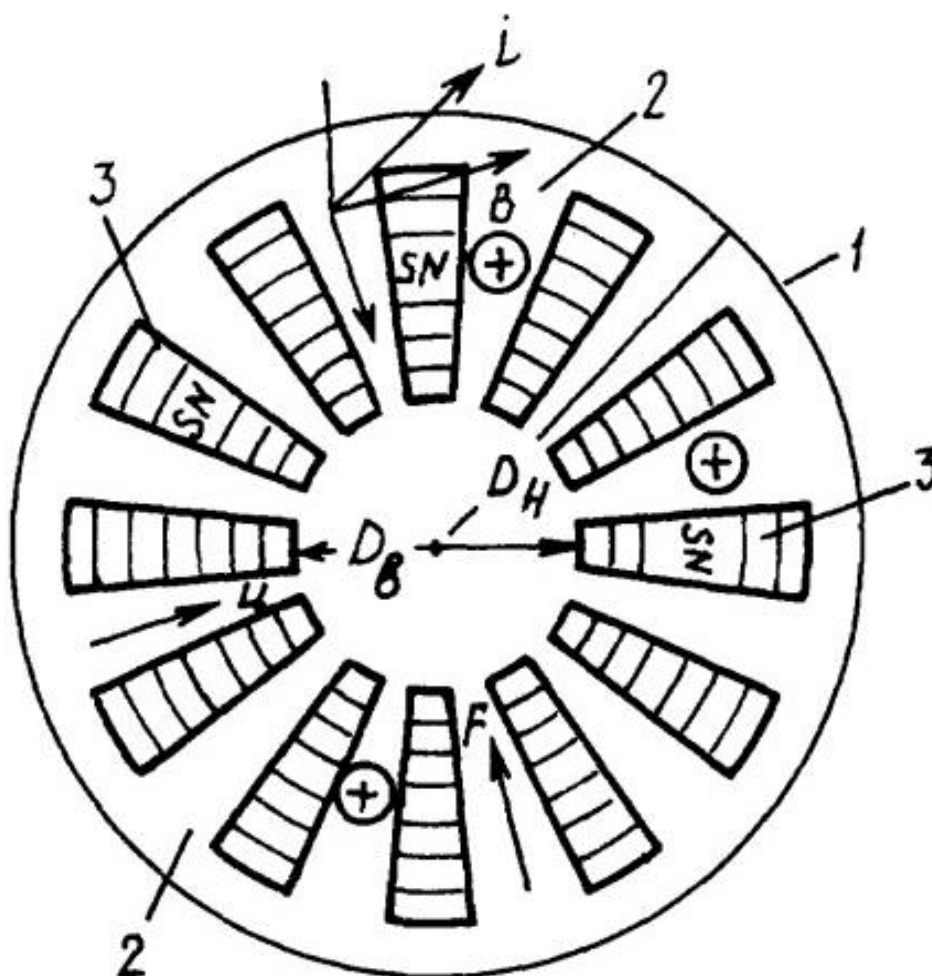


Рисунок 1.4 – Багатоканальний МГД-насос

Сфери застосування: атомна енергетика в реакторах на швидких нейтронах, в металургії і інших областях, де потрібно перекачування рідкого металу.

Головний недолік МГД-насосів постійного струму полягає в тому, що при значній потужності насоса через короб з рідким металом на відстані поздовжньої осі насоса потрібно пропускати струми, що досягають кілька сотень тисяч ампер при напрузі 1-2 вольт. Це створює великі труднощі у створенні джерела живлення струму при складній конструкції шин, що підводять струм.

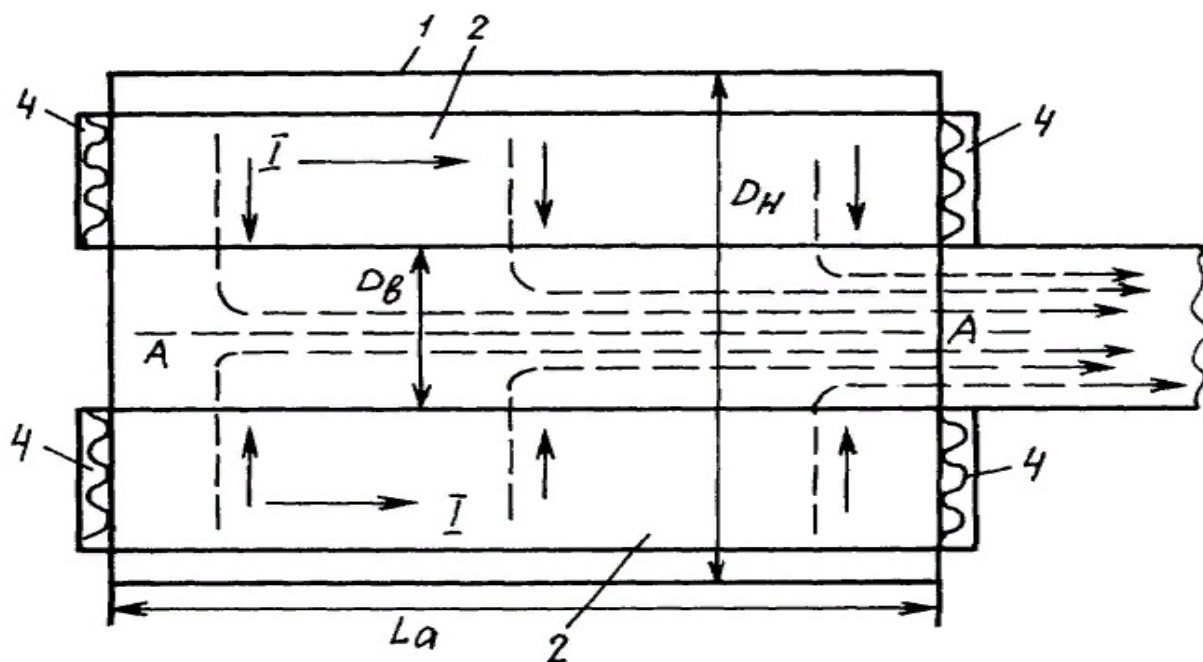


Рисунок 1.5 – Багатоканальний МГД-насос

Суть пропонованого МГД-насоса полягає в тому, що він виконаний з числом каналів більше двох, що звужуються від периферії до центру насоса, а система збудження виконана у вигляді постійних магнітів, розташованих між каналами і магнітні потоки, які створюються в каналах, вектори індукції яких спрямовані по концентричних колах щодо поздовжньої осі.

Насос складається з корпусу 1 у вигляді ділянки труби з зовнішнім діаметром  $D_H$ , ділянки внутрішньої труби з діаметром  $D_B$ ; довжина обох ділянок –  $L_a$ . У наведеному прикладі метал прокачується через дванадцять каналів 2, що звужуються від зовнішньої труби до внутрішньої. Між каналами 2 розташовані постійні магніти 3, які створюють магнітний потік  $\Phi$  в каналах 2. Вектори індукції магнітного потоку спрямовані по концентричних колах щодо поздовжньої осі А-А. Струми  $I$ , що пропускаються через метал, підводяться до металу за допомогою шин 4 і спрямовані вздовж каналів 2.

Завдяки взаємодії магнітного потоку  $\Phi$  з струмом  $I$  в каналах 2 на метал діє електромагнітна сила –  $F$ , пропорційна добутку  $\Phi \cdot I$ , що переміщає метал від периферії до центру, в зону труби з діаметром  $D_B$ . Напрямок переміщення металу в каналах 2 радіальний до поздовжньої осі А-А. Завдяки звуженню каналу 2 від

периферії до центру метал нарощує швидкість пересування і кінетичну енергію на виході з каналу 2, цим створюється натиск у внутрішній трубі насоса, що забезпечує просування рідини поза насосом по гідравлічній системі, яка обслуговується насосом.

Переваги пропонованого МГД- насоса:

- збільшення числа каналів в даному прикладі в дванадцять разів у порівнянні з аналогами, де використовується один канал, дозволяє скоротити активну довжину насоса  $L_a$  в цій кратності;

- збільшення радіальної висоти каналу і зменшення його ширини дозволяє збільшити магнітний потік в каналах при заданій магніторушійній силі системи збудження;

- граничне спрощення системи збудження насоса з використанням досить досконалих зараз постійних магнітів з високою намагнічуючою силою, що забезпечить підвищену продуктивність насоса;

- різке спрощення системи підведення струму до каналів з металом за рахунок послідовного включення ділянок каналів до зовнішнього джерела струму. Струм по каналах 2 в наведеному прикладі зменшується в 12 разів. За рахунок цього різко спрощується проблема живлення насоса. Замість напруги живлення 1-2 В потрібен джерело на 12-24 В при малих струмах. Як джерело можна використовувати понижуючий трансформатор і напівпровідниковий випрямляч.

Перераховані переваги МГД-насоса дозволять при заданій продуктивності значно спростити конструкцію насоса і системи його живлення, зменшити його розміри і знизити вартість, підвищити ККД і скоротити витрати на виготовлення і обслуговування.

Відмінними рисами МГД-насосів є простота конструкції і висока надійність. У них легко забезпечується герметичність робочого каналу, тому вони добре пристосовані для перекачування агресивних провідних середовищ. Впровадження в практику надпровідникових і кріопровідникових магнітних систем з великими полями дозволить використовувати МГД-насоси для слабкопровідних рідин: розчинів солей і кислот, палив, біологічних рідин, морської води . В останньому

випадку МГД-насос може служити основним елементом МГД-рушія для морських установок. Електромагнітна сила в каналі МГД-насоса розганяє морську воду в напрямку, протилежному руху, за рахунок чого створюється реактивна сила руху.

### 1.6. Принцип пристрою і дії МГД-рушіїв

Принцип дії МГД-рушіїв морських суден заснований на взаємодії струмів, що протікають в морській воді, з зовнішнім магнітним полем і виникненні внаслідок цього електромагнітної сили. Ця сила збільшує тиск і швидкісний напір потоку на виході перетворювача. МГД-рушії мають ряд переваг в порівнянні з традиційними системами силового приводу судів: безшумність, маневреність і швидкий реверс, можливість досягнення високих швидкостей суден, відсутність обертових високонапружених частин, зняття проблеми ущільнення валів приводних гвинтів і ін.

Заповітною мрією кораблебудівників є створення судна, що має велику швидкість ходу і безшумний рух при можливо високому значенні його повного пропульсивного коефіцієнта.

Одним з основних напрямків вирішення всього комплексу завдань є розробка принципово нової судової електроенергетичної установки з безгвинтовим МГД-рушієм.

На відміну від звичайних такі установки об'єднують функції гребного електродвигуна і гребного гвинта. При цьому в якості джерела струму може бути використаний МГД-генератор, який здійснює пряме перетворення теплової енергії в електричну, тобто виключаючи багатоступінчастий шлях, який використовується в даний час на судах-електроходах.

Слід особливо підкреслити, що сама ідея створення гідрореактивного рушія, що прискорює потік морської води дією електромагнітних сил, не нова.

Добре відомо, що відповідно до закону електромагнітної індукції при русі провідника з струмом в постійному магнітному полі з боку останнього на провідник діє сила (сила Ампера), що дорівнює:

$$F = I \cdot [\vec{l} \cdot \vec{B}],$$

де  $I$  – сила струму;  $l$  – вектор, чисельно рівний довжині провідника і спрямований в ту ж сторону, що і вектор  $j = I/S$  щільності струму, що проходить по провіднику перетином  $S$ ;  $B$  – силова характеристика магнітного поля, вектор магнітної індукції.

Напрямок сили  $F$  при взаємній перпендикулярності  $l$  і  $B$  визначається правилом лівої руки.

Якщо в якості провідника електричного струму розглядати морську воду, то сили Ампера, що виникають в результаті взаємодії струму, що пропускається через воду, з постійним магнітним полем будуть прискорювати масу  $m$  води, що протікає через поле, викликаючи безперервне збільшення швидкості  $W_a$  потоку. Таке збільшення відповідно до теорії ідеального гідрореактивного рушія зумовлює появу сили тяги:

$$P_e = m \cdot W_a,$$

яка долає силу  $R$  опору руху судна.

Незважаючи на простоту ідеї, її технічна реалізація до останнього часу не знаходила свого рішення.

Причина такого стану справ криється в тому, що створення установки з постійними магнітами дає можливість досягти значень ККД МГД-рушія лише не більше кількох відсотків.

Якщо використовувати електромагніти з обмотками із звичайних матеріалів, таких як мідь, алюміній і зі сталевим сердечником, то величина магнітної індукції  $B$  обмежується умовами насичення сердечника і становить лише близько 2 Тл. При такій індукції навіть для ККД  $3 \div 5\%$  маса електромагніту виходить надмірно великою, приблизно декількох сотень тонн. Для отримання ж ККД 30% і вище потрібно, як показують розрахунки, магнітні поля з індукцією  $B \geq 10$  Тл.

Добре відомо, що робота звичайного електродвигуна пов'язана з переміщенням металевих провідників зі струмом в магнітному полі.

У МГД-рушії роль провідника виконує морська вода. Процес МГД-перетворювача наближено описується наступними трьома рівняннями:

- густина електричного струму:

$$j = \sigma(BV - E), \text{ А/м}^2;$$

- сила, яка діє на одиницю об'єму морської води:

$$f = \frac{dp}{dZ} = jB, \text{ Н/м}^3;$$

- електрична потужність, яка відповідає одиничному об'єму прискореної маси води:

$$N_{yy} = \rho V \frac{dh}{dx} = jE, \text{ кВт.}$$

В зазначених вище рівняннях:

$\sigma$  – питома електрична провідність морської води, Ом /м;

$B$  – індукція магнітного поля, Тл;

$V$  – швидкість потоку морської води, м/с;

$E = U/\epsilon$  – напруженість однорідного електричного поля; В/м;

$U$  – напруга між електродами, В;

$B$  – відстань між електродами, м;

$P$  – тиск води, Па;

$\rho$  – щільність забортної води, кг/м<sup>3</sup>;

$h$  – ентальпія одиниці маси води, Дж/кг.

Якщо позначити  $E/BV = \eta$ , який називається навантажувальним параметром, то можна отримати:

$$N_{yy} = \sigma B^2 V^2 \eta \cdot (1 - \eta).$$

З цього виразу випливає, що потужність, яку можна повідомити одиничному обсягу прискореної забортної води при заданих значеннях швидкості  $V$  і навантажувального параметра  $\eta$ , визначається перш за все величинами індукції магнітного поля  $B$  і питомої електропровідності води  $\sigma$ .

Треба мати на увазі, що збільшення потужності і, відповідно, пропульсивного коефіцієнта за рахунок штучного підвищення навіть в 5 - 10 разів електропровідності морської води введенням різного роду присадок на вході в МГД-рушій, а також її нагріванням в суднових умовах неможливо через велику масу води, що проходить через рушій.

Перепад тиску, обумовлений дією сили Ампера, можна висловити співвідношенням:

$$\rho_1 - \rho_2 = jBL,$$

де  $\rho_1$  – тиск на вході в МГД-рушій;  $\rho_2$  – тиск на виході з МГД-рушії;  $L$  – довжина проточного каналу рушії.

Далі можна легко отримати формулу для довжини проточного каналу рушії:

$$L = \frac{\rho_1 - \rho_2}{\sigma B^2 V (1 - \eta)}.$$

З вищезазначеної формули видно, що довжина каналу, так само, як і потужність, залежить від величини магнітної індукції  $B$ , і в міру її росту  $L$  різко скорочується.

Таким чином, для отримання прийнятних масогабаритних характеристик МГД-рушіїв необхідні ефективні магнітні системи, здатні створювати сильні магнітні поля у великих обсягах. При цьому надзвичайно важливо, щоб такі системи споживали мінімум електроенергії на власні потреби, тобто володіли мінімальною енергоємністю.

Хорошу ілюстрацію ступеня ефективності роботи МГД-рушії дають наведені на рисунку 1.6 криві залежності його ККД від швидкості ходу при різних значеннях індукції магнітного поля. Графіки побудовані для підводного судна за даними американського дослідника Дороха.

В своїх розрахунках Дорох брав водотоннажність судна  $\Delta = 2000$  т, довжину МГД-каналу  $L = 15$  м і площа його поперечного перерізу  $S = 7$  м<sup>2</sup>.

Побудовані криві говорять про те, що в міру зростання швидкості ходу ККД зменшується, і до того ж тим інтенсивніше, чим менше індукція магнітного поля.

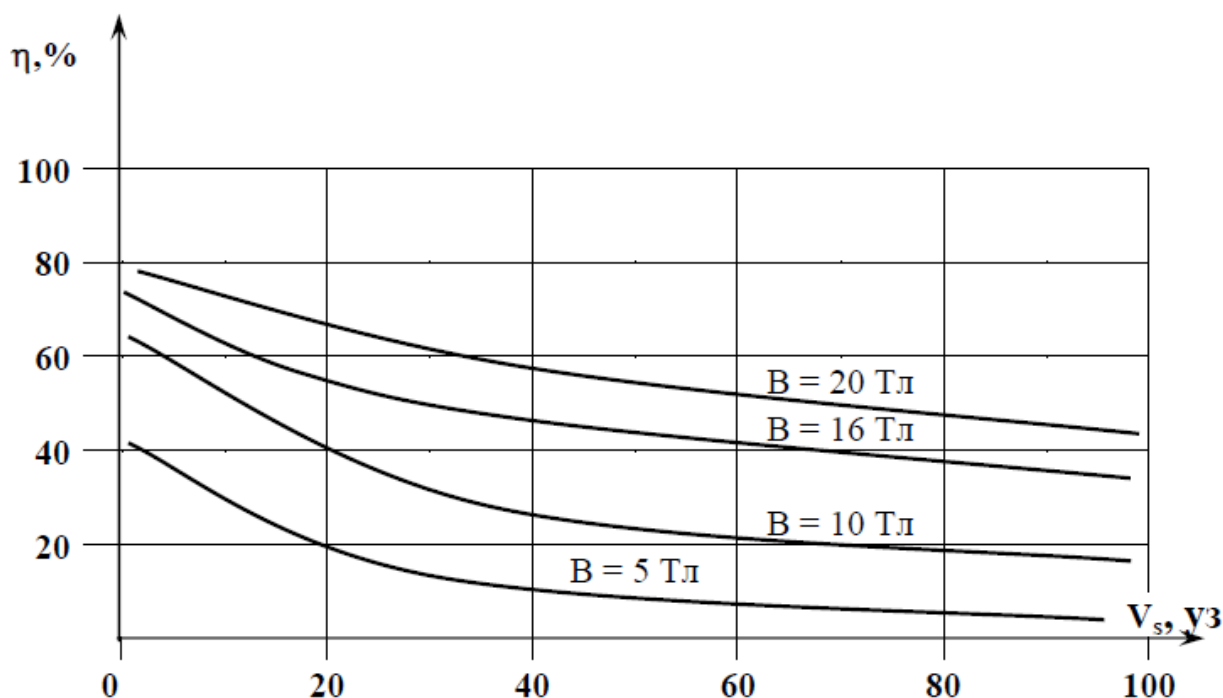


Рисунок 1.6 – Криві залежності ККД МГД-рушія від швидкості ходу і індукції магнітного поля

При швидкості ходу 20 - 30 вузлів для отримання ККД близько 30% достатньо мати поля з індукцією  $B = 8 \text{ Тл}$ . Поля з  $B = 10-20 \text{ Тл}$  дозволяють отримати ККД в інтервалі 40-75%. При швидкостях ходу 50-70 вузлів для отримання ККД понад 30% необхідні поля з індукцією  $B \geq 10 \text{ Тл}$ .

Настільки сильні магнітні поля можуть бути отримані тільки за допомогою надпровідних магнітних систем.

Таким чином, використання систем з високою індукцією магнітного поля дозволяє зробити МГД-рушій реальним і перспективним судновим рушієм.

В даний час відомі кілька варіантів конструктивного виконання МГД-рушіїв. Всі вони за способом передачі енергії від джерела струму до прискорюючого робочого тіла – морської води можуть бути:

- кондукційними, в схемах яких електроенергія підводиться до електродів, тобто безпосередньо до води;
- індукційними, в схемах яких реалізується безелектродне перетворення змінного струму в механічну енергію руху судна.

За дією об'ємної електромагнітної сили на воду МГД-рушії можуть бути двох типів:

- каналними з внутрішнім магнітним полем;
- безканалними із зовнішнім (відкритим) магнітним полем.

Кондукційний каналний МГД-рушій, зображений на рисунку 1.7, представляє собою канал 1, оптимальна геометрична форма якого визначається мінімальним значенням відношення його поверхні до об'єму, оскільки гідравлічні втрати залежать від величини поверхні.

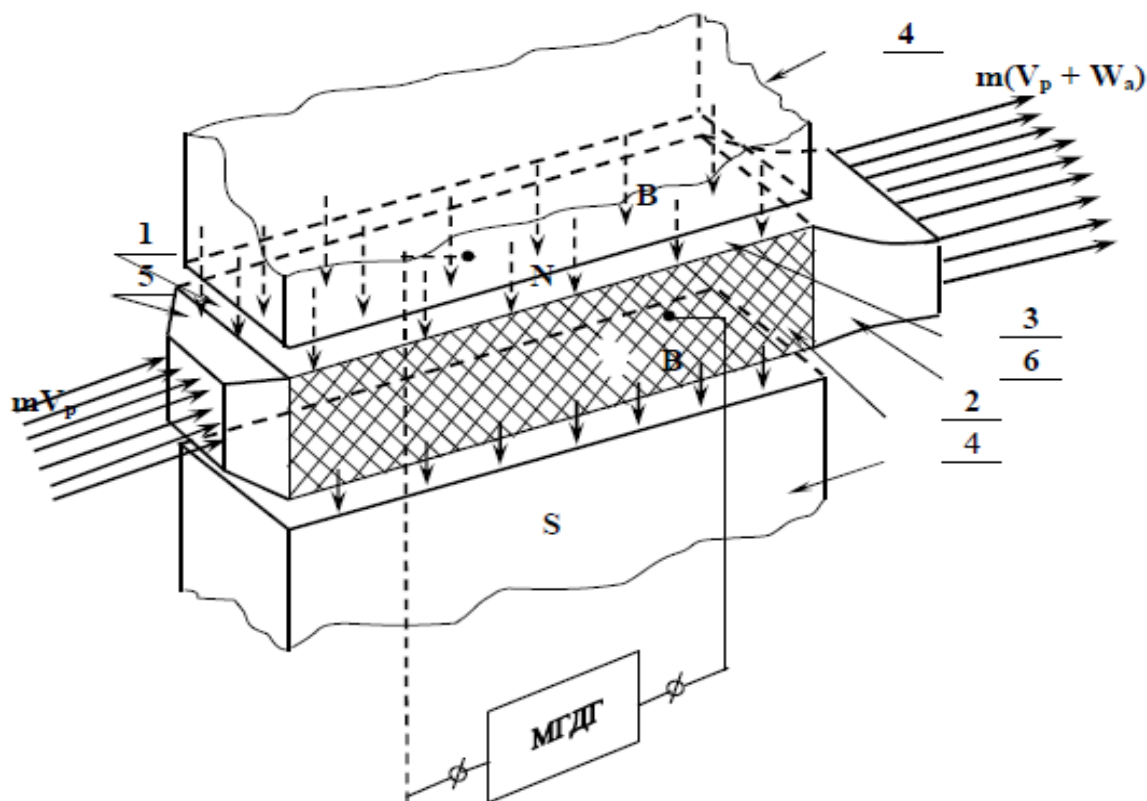


Рисунок 1.7 – Схема кондукційного каналного МГД-рушія

Ця умова обумовлює розгляд конструкцій МГД-рушія з лінійним каналом прямокутного і круглого перерізу, а також з гвинтовим каналом. Виконані дослідження показують, що при незмінній довжині  $L$  площа  $S$  перерізу каналу значно впливає на загальний ККД лише при  $S \leq 10 \text{ м}^2$ .

Струмopовідні стінки 2 є електродами, виготовленими з цегли двоокису цирконію.

До них підводиться струм від суднового електрогенератора. Крізь, струмоізолювані блоками з окису магнію, стінки 3 проходять лінії магнітної індукції  $B$  зовнішнього однорідного магнітного поля електромагніту постійного струму 4. Канал має вхідний дифузійний 5 і вихідний конфузійний 6 насадки, через які протікає деяка маса  $m$  води при забортному тиску і швидкісному напорі, зумовленими глибиною погруження МГД-рушія і швидкістю ходу судна.

При підведенні до електродів напруги від джерела постійного струму, наприклад від МГД-генератора, через морську воду в каналі потече струм, щільність  $j$  якого визначається законом Ома для рухомих середовищ. В результаті потоку води повідомляється механічна енергія, яка витрачається як на створення сили тяги, так і на покриття гідродинамічних втрат.

Упор, таким чином, забезпечується зміною кількості руху  $mV_p$  на вході МГД-рушія і на виході з нього  $-m(V_p + W_a)$ .

Перевага каналної системи полягає в тому, що до мінімуму знижуються магнітні та електричні поля розсіювання, оскільки електромагнітні сили створюються і діють на воду в обмеженому обсязі води.

До основних недоліків установок з каналними МГД-рушіями слід віднести:

- по-перше, те, що обсяг води, на який впливають електромагнітні сили, порівняно невеликий, і це збільшує втрати енергії в каналі;
- по-друге, через наявність проточного каналу зменшується корисна водотоннажність судна.

Для збільшення потужності каналного МГД-рушія при незмінній щільності струму потрібне збільшення розмірів каналу, що, як сказано вище, різко знижує корисний об'єм судна.

Цього недоліку позбавлений безканалний МГД-рушій з зовнішнім магнітним полем, в схемі якого взаємно перпендикулярні магнітне і електричне поля створюються в забортній воді, що омиває корпус судна. Це дозволяє зменшити гідродинамічні втрати, збільшити корисний об'єм судна. Крім того, зовнішнє магнітне поле може сприяти зниженню опору руху завдяки ламінаризації потоку води.

Вважається, що МГД-установки із зовнішнім магнітним полем найбільш доцільно використовувати для руху великих підводних танкерів.

Японські ж кораблебудівники вважають, що такий рушій досить зручний для використання його на криголамах, так як при цьому корпус судна не матиме виступаючих частин у вигляді гребних гвинтів і кронштейнів гребних валів. При такій пропульсивній установці можливий локалізований нагрів забортної води, а також витяг з неї газів для системи обдування корпусу при ході в льодах і внутрішньосуднових потреб.

Принципова схема МГД-установки криголама з зовнішнім магнітним полем приведена на рисунку 1.8. Аналіз цього рисунку дозволяє усвідомити принцип пристрою і роботи МГД-рушія з відкритим магнітним полем.

Система збудження виконана у вигляді надпровідних короткозамкнутих обмоток 1, покладених в поздовжньому напрямку поблизу поверхні дна корпусу криголама. Провідники 2 обмоток поміщені в судини Д'юара 3 з рідким гелієм і оточені вакуумним кільцевим простором з екраном для захисту від теплопритоків з навколишнього середовища. Електроди 4 розташовані уздовж надпровідних обмоток. Постійні струми, що подаються від генераторів суднової електростанції, та, що проходять з поруч розташованими поздовжніми провідниками обмоток, спрямовані в протилежні сторони. В результаті цього магнітні поля, що створюються в забортній воді складаються від суміжних провідників. Оскільки напрямок магнітного поля в основному перпендикулярний лініям електричного струму, то на морську воду буде діяти сила, спрямована уздовж корпусу судна. Реакція води, яка відкидається цієї електромагнітної силою, створює рушійну силу тяги.

Система збудження виконана у вигляді надпровідних короткозамкнутих обмоток 1, покладених в поздовжньому напрямку поблизу поверхні дна корпусу криголама.

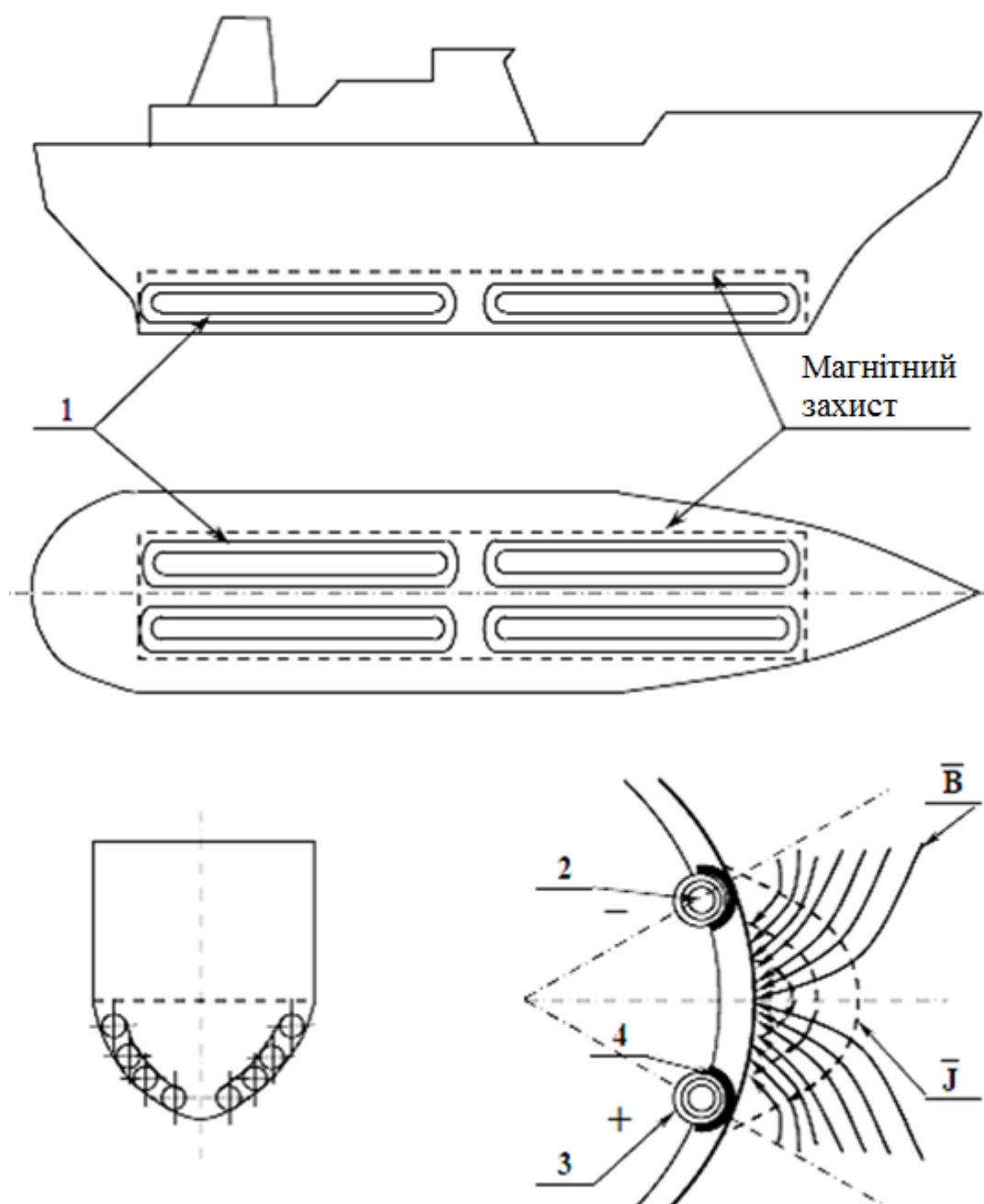


Рисунок 1.8 – Принципова схема МГД-рушія криголама з зовнішнім магнітним полем

Провідники 2 обмоток поміщені в судини Д'юара 3 з рідким гелієм і оточені вакуумним кільцевим простором з екраном для захисту від теплопритоків з навколишнього середовища. Електроди 4 розташовані уздовж надпровідних обмоток. Постійні струми, що подаються від генераторів суднової електростанції, та, що проходять з поруч розташованими поздовжніми провідниками обмоток, спрямовані в протилежні сторони. В результаті цього магнітні поля, що

створюються в забортній воді складаються від суміжних провідників. Оскільки напрямок магнітного поля в основному перпендикулярний лініям електричного струму, то на морську воду буде діяти сила, спрямована уздовж корпусу судна. Реакція води, яка відкидається цієї електромагнітної силою, створює рушійну силу тяги.

Основні проблеми, що підлягають вирішенню при реалізації цього типу МГД-рушія, полягають, по-перше, в розробці способів кріплення надпровідних обмоток, що компенсують досить значні електродинамічні зусилля. Такі бандажні пристрої при цьому не повинні створювати надмірних теплових припливів.

По-друге, повинна бути вирішена проблема, пов'язана з наявністю всередині судна магнітного поля, що обумовлює притягіння сталевих тіл, що знаходяться поблизу обшивки корпусу, як всередині судна, так і за його межами, а також захист людей від впливу полів.

Розглянуті кондукційні схеми постійного струму створюють значні труднощі в забезпеченні корозійної стійкості, як самих каналів, так і прилеглих судових конструкцій.

Ці труднощі відсутні в схемі індукційного типу, які дозволяють здійснити безелектродне перетворення електроенергії змінного струму в механічну енергію руху судна.

В установках цього типу обмотка електромагніту багатозафазова і створює так зване рухоме магнітне поле. Це поле індукує в робочому середовищі – морській воді вихрове електричне поле, під дією якого виникають короткозамкнені електричні струми. Взаємодія рухомого магнітного поля з викликаними в воді струмами обумовлюють появу об'ємної електромагнітної сили, що прискорює потік води.

Як і кондукційні, індукційні схеми можуть бути каналними і з зовнішнім рухомим магнітним полем, подібним до показаному на рисунку 1.9.

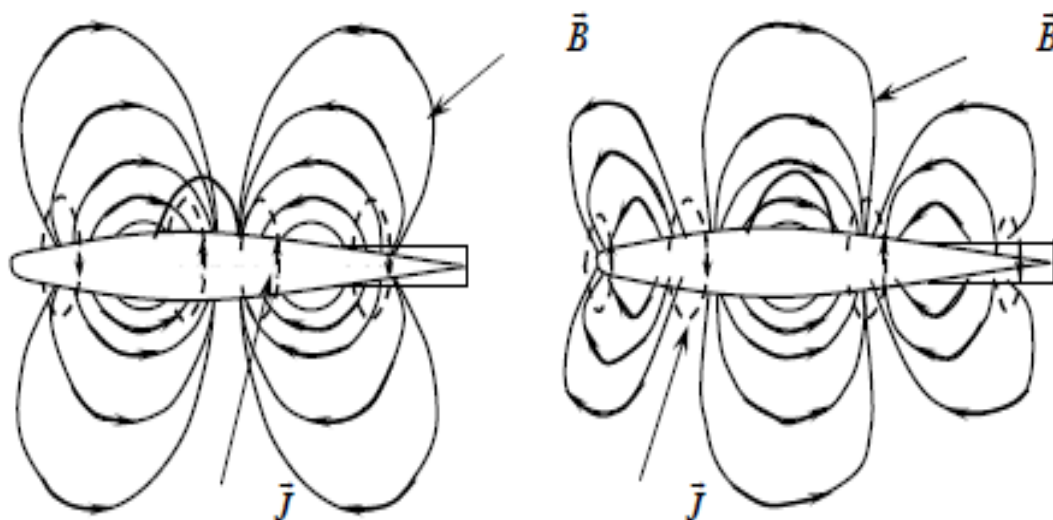


Рисунок 1.9 – Розташування магнітних полів в індукційному МГД-рушії із зовнішнім полем в різні моменти часу

### 1.7. Комплектація агрегатів електромагнітної суднової пропульсивної установки

Розглянуті можливі конструктивні варіанти представляють особливий інтерес у зв'язку з можливістю використання в якості джерел електроенергії потужних МГД-генераторів. В цьому випадку виявляється принципово можливим виконання всієї енергетичної установки в одному блоці, в якому у МГД-генератора і МГД-рушії була б загальна надпровідна магнітна система.

Один з варіантів схеми такої пропульсивної установки наведено на рисунку 1.10.

В камеру згорання 1 подається паливо, присадки для іонізації газів і повітря, що нагнітається компресором 2 через підігрівач 3. Електрична напруга, що знімається з електродів 4 МГД-генератора, подається на електроди 5 МГД-рушії. Напруга МГД-генератора регулюється зміною струму збудження в електромагнітах 6 спеціальною системою керування 7.

Індукція магнітного поля надпровідного електромагніту 8 МГД-рушії також регулюється відповідною зміною струму в його обмотках.

Висока температура відпрацьованої плазми використовується для отримання пару в пароутворюючих секціях 9. Отриманий пар приводить в дію турбіну

високого тиску 10, що обертає компресор 2 і турбіну низького тиску 11, яка приводить в дію електрогенератор 12, енергія якого використовується для допоміжних загальносуднових потреб.

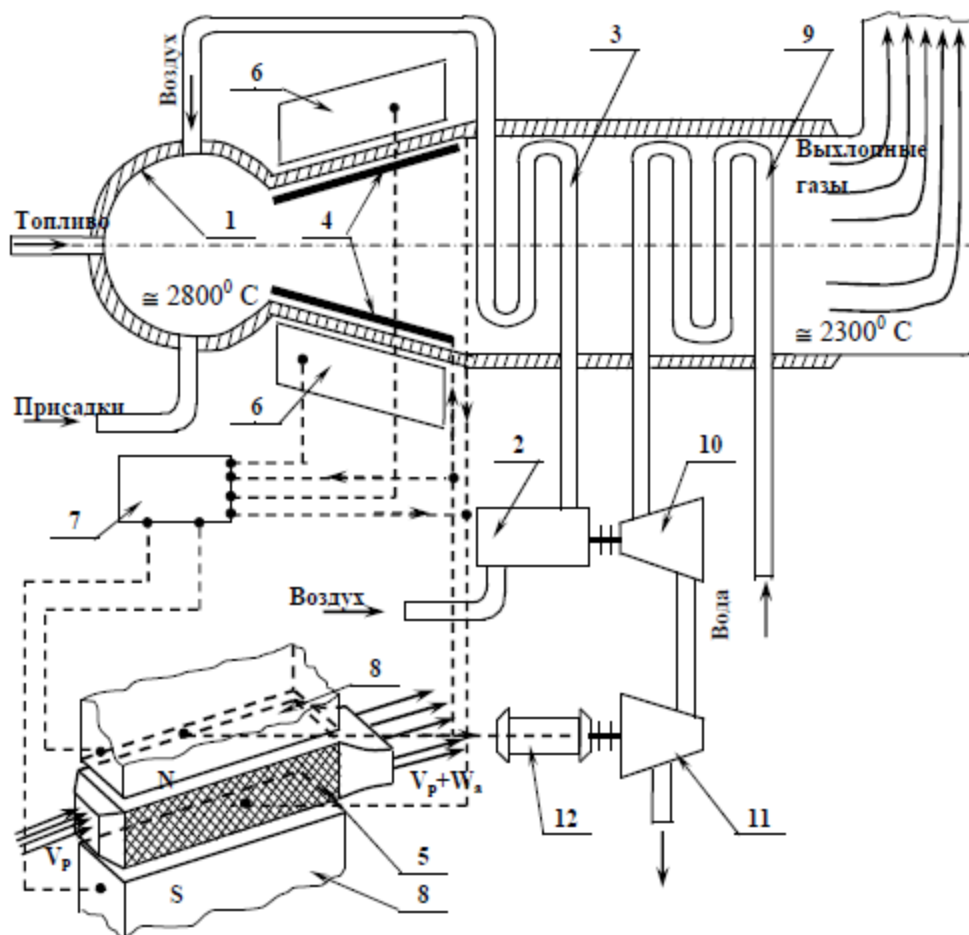


Рисунок 1.10 – Принципова схема електромагнітної суднової установки з каналним МГД-рушієм

Проходження електричного струму через морську воду призводить до виділення на електродах газів, головним чином хлору і водню.

Ці газу при викиді струменем води з каналу МГД-рушія будуть діяти як пульсуюча маса, створюючи шум і помітний слід.

Один з можливих способів відведення газів полягає в тому, що вони відводяться через пористі електроди і потім спалюються в паливних елементах. Утворену при цьому енергію можна обернути на приведення в дію самої системи видалення газів.

### 1.8. Магнітогідродинамічний двигун для підводних човнів та суден

Китайська корпорація CSIC в середині жовтня 2017 року провела перші успішні випробування прототипу магнітогідродинамічного двигуна, «тихого» рушія без рухомих частин для перспективних підводних човнів. Як повідомляє GlobalTimes, випробування установки проводилися на кораблі, приписаного до порту в Сан'є в провінції Хайнань. Випробування двигуна були визнані успішними.

Найпростіша конструкція МГД-двигуна представляє собою канал, по якому рухається рідина, і розташовані по його сторонам електромагніти. Під час роботи на електромагніти подається напруга, виникає магнітне поле, яке провокує появу в рідкому середовищі рушійної сили. При цьому рідина, що проходить по каналу, повинна бути електролітичної, тобто проводити струм.

У випадку з морським МГД-двигуном електролітичною рідиною виступає морська вода. Оскільки в такому двигуні відсутні рухомі частини, він практично не шумить - рівень гідродинамічного шуму проходить крізь установку води і працюючих електромагнітів на порядки менше шуму стандартних рушіїв надводних і підводних суден.

Згідно із заявою CSIC, під час випробувань корабель з новою установкою зміг досягти розрахункової швидкості. На якому саме кораблі проводились випробування і якої конкретно швидкості він зміг досягти, не розкривається. Випробування проводилися 18 жовтня 2017 року.

Слід зазначити, що спроби створити морський магнітогідродинамічний двигун робилися і раніше. У 1980-х роках такий двигун вважався «установкою майбутнього» для тихих підводних човнів.

У 1992 році в Японії проводилися випробування дослідного надводного судна «Ямато-1», що приводився в рух магнітогідродинамічним двигуном. Під час випробувань судно, розроблене корпорацією Mitsubishi Heavy Industries, змогло розвинути швидкість в вісім вузлів (14,8 кілометри на годину). Під час наступних випробувань «Ямато-1» не змогло розвинути швидкість понад вісім вузлів.

Вважалося, що МГД-двигуни, крім тихої роботи, дозволять кораблям розвивати швидкості більші, ніж дозволяли традиційні рушії з гребними гвинтами.

Під час випробувань «Ямато-1» і кількох інших прототипів суден з новими установками високих швидкостей досягти так і не вдалося. Проект закрили.

На «Ямато-1» стояв МГД-двигун з 6 рушіями і електромагнітами, які охолоджувалися рідким гелієм. Сьогодні «Ямато-1» знаходиться в морському музеї в Кобе (рисунок 1.11), а магнітогідродинамічний двигун судна – в музеї морської науки в Токіо (рисунок 1.12).



Рисунок 1.11 – «Ямато-1» в морському музеї в Кобе

Комерційному впровадженню МГД-рушіїв для підводних човнів заважає те, що поки що досягнута ефективність в рази програє гребному гвинту. Основні причини низької ефективності - погана провідність морської води і відносна дороговизна створення сильного магнітного поля (з індукцією в кілька одиниць тесла).



Рисунок 1.12 –Магнітогідродинамічний двигун судна«Ямато-1» в музеї морської науки в Токіо

МГД-рушій перспективно більш надійний пристрій, ніж гребний гвинт. Особливо актуальним в МГД-рушії є відсутність рухомих механічних частин. В екстремальних умовах Північного Льодовитого океану, коли виконання будь-яких ремонтних робіт пов'язане зі значно великими труднощами, ніж в теплих морях, це може бути приводом «закрити очі» на дещо меншу ефективність МГД-рушія в порівнянні згребним гвинтом.

Установка МГД-рушіїв на підводні човни та підводні судна є більш ефективною у порівняння з установкою МГД-рушіїв у надводні судна. Оскільки для підводних човнів збільшення маси є бажаною властивістю (на відміну від надводних суден), це створює умови для створення джерел магнітного поля з більш високою індукцією. Одночасно рух на глибині дозволяє значно скоротити хвильовий опір.

Електричний опір води змінити не можна. Але можна вибирати маршрути з підвищеною солоністю, яка зменшує опір води (і уникати маршрутів зі зниженою солоністю). Як правило, знижена солоність морів і океанів викликана стоком річок

і таненням льодів, при цьому менш щільна майже прісна вода знаходиться на поверхні і погано перемішується з нижніми, більш солоними і щільними шарами. Якщо рух відбувається не по поверхні, а на глибині 100 м, то солоність води свідомо вище поверхневої, отже, і омичний опір води нижче. Це дозволяє зменшувати електричний опір.

Судно містить магнітогідродинамічний рушій, виконаний у вигляді розташованих в осьовому каналі, що проходить від носа судна до корми і укладеному між полюсами постійного магніту, електродів, при цьому електроди з'єднані з джерелом електричної напруги. Джерело електричної напруги виконане у вигляді хвильових електрогенераторів, які встановлені зовні корпусу вздовж бортів і кожен з яких складається з магнітного якоря, з'єданого з поплавком і вміщеного в вертикальну направляючу, виконану з не електропровідних матеріалів в формі трубки з отворами, з'єднуючими її порожнину з навколишнім середовищем, а також обмотки статора, укладеної в магнітопровід і вміщеній в коробку, що охоплює направляючу. Технічний результат полягає в скороченні витрати пального.

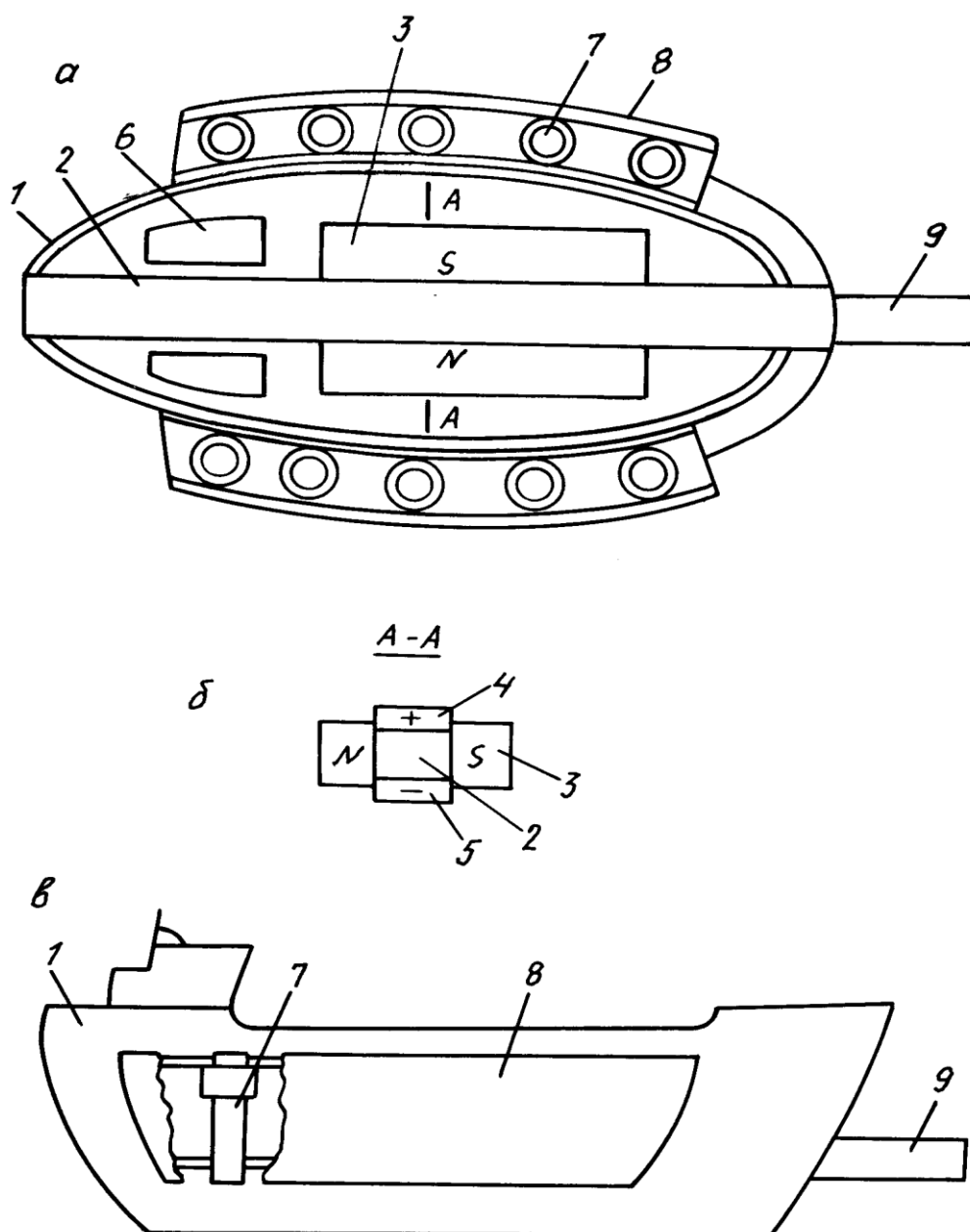
Уздовж бортів встановлені щити, що захищають хвильові електрогенератори. До осьового каналу приєднано сопло з можливістю його повороту в горизонтальній площині.

Суть винаходу пояснюється рисунком 1.13, на якому представлені: а) горизонтальний розріз судна, б) поперечний розріз осьового каналу судна, в) вид судна збоку.

Пропоноване морське судно має корпус 1, осьовий канал 2 прямокутного перерізу, укладений між полюсами постійного магніту 3.

У каналі 2 закріплені електроди 4 і 5. У середині корпусу поміщені акумулятори 6. Хвильові електрогенератори 7 закріплені уздовж бортів і захищені щитами 8.

До осьового каналу з кормового боку приєднано з можливістю повороту в горизонтальній площині сопло 9.



а) горизонтальний розріз судна, б) поперечний розріз осевого каналу судна, в) вид судна збоку

Рисунок 1.13 – Магнітогідродинамічний рушій на судні для економії пального

Судно працює наступним чином. Хвилі підіймають і опускають поплавці, які за допомогою штоків переміщують якорі всередині статорів. В обмотках статорів наводиться ЕРС, яка через випрямлячі подається на електроди 4 і 5, а також на акумулятори 6 і інші механізми судна. Між електродами 4 і 5, що мають різний заряд в каналі 2 по морській струмопровідній воді, з'являється електричний струм,

напрямок якого перпендикулярно магнітному полю між полюсами магніту. Під час його взаємодії з магнітним полем магніту 3 виникає електромагнітна сила, що переміщає морську воду по каналу 2. Утворюється реактивна сила, яка штовхає судно в протилежному напрямку. При необхідності зміни напрямку руху судна повертають на необхідний кут сопло 9.

У хвильових електрогенераторах електрична напруга виробляється за рахунок енергії хвиль, і для роботи механізмів судна не потрібно пального.

## РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ МАГНІТОГІДРОДИНАМІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ МОРСЬКОЇ ВОДИ

### 2.1. Електромагнітні властивості морської води

Електромагнітне поле в речовині залежить від його властивостей. Молекули речовини можуть мати магнітні моменти, в ньому можуть бути вільні електрони і іони, що створюють електричний струм під впливом магнітного або електричного поля. Електромагнітне поле в морській воді залежить як від структури самої води, так і від наявності іонів солей, що виконують роль вільних електронів.

Основною характеристикою електричного поля в якійсь точці є напруженість  $E$  (В/м), тобто сила, з якою електричне поле діє на точковий заряд, поміщений в згадану точку. Оскільки молекули води є диполями, то під впливом зовнішнього електричного поля відбувається впорядкована орієнтація диполів. Теплові коливання молекул істотно спотворюють їх взаємну орієнтацію і тільки невелика частина з них орієнтується по вектору напруженості, тобто проявляється лише тенденція до впорядкованої орієнтації диполів молекул. Вона характеризується сумою електричних дипольних моментів молекул  $\sum_i \vec{P}_i$ , що припадають на обсяг  $v$ , тобто дипольним моментом, або вектором поляризації:

$$\vec{P}_e = \frac{1}{v} \sum_i \vec{P}_i (\text{Кл/м}^2).$$

У слабкому електричному полі, характерному для океану, має місце співвідношення:

$$\vec{P}_e = \chi_e \cdot \vec{E}.$$

У морській воді також відбувається рух іонів і створюється різниця потенціалів. Все це об'єднується з класичним дипольним моментом і впливає на величину параметра  $\chi_e$  – діелектричну сприйнятливість морської води. Вона залежить від частоти змін  $\vec{E}$ , температури  $T$  і деяких інших характеристик.

При змінах  $\vec{E}$  з частотою  $f < 10^8$  Гц і температурі близько 20 °С:

$$\chi_e \approx 7,1 \cdot 10^{-10} \text{ ф/м}.$$

Сумарна напруженість електричного поля, яка називається електричною індукцією  $\vec{D}$  (Кл/м<sup>2</sup>) представляється виразом:

$$\vec{D} = \vec{P}_e + \varepsilon_0 \vec{E}.$$

Множник  $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  ф/м, який називається діелектричною постійною, вводиться в системі СІ через різні розмірності  $\vec{D}$  і  $\vec{E}$ . Формула електричної індукції може бути переписана у вигляді:

$$\vec{D} = (x_e + \varepsilon_0) \vec{E} = \varepsilon_0 \left( \frac{x_e}{\varepsilon_0} + 1 \right) \vec{E} = \varepsilon_0 \varepsilon \vec{E}.$$

Безрозмірне відношення  $\frac{x_e}{\varepsilon_0} = X_e$  називається діелектричною сприйнятливістю. Величина  $\varepsilon = X_e + 1$  – діелектричною проникністю.

Діелектрична проникність морської води залежить від частоти змін напруженості електричного поля. При постійному  $\vec{E}$  величину  $\varepsilon$  зазвичай називають статичною і позначають  $\varepsilon_c$ .

Оскільки швидкість переорієнтування молекул води під впливом змінного  $\vec{E}$  кінцева, то чим більше частота змін  $\vec{E}$ , тим менше  $\vec{P}_e$ , так як все більше число молекул не встигає переорієнтуватися. Відбувається також деякий зсув величини  $\vec{P}_e$  по фазі щодо  $\vec{E}$ .

Зрушення по фазі прийнято враховувати введенням уявного доданка, тобто:

$$\varepsilon = \varepsilon' - i\varepsilon''.$$

Реальна і уявна складові змінюються зі зміною частоти. В ідеальному діелектрику ці зміни представляються дисперсійними співвідношеннями Дебая:

$$\varepsilon' = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_c - \varepsilon_\infty}{1 + (2\pi f\tau)^2};$$

$$\varepsilon'' = \frac{(\varepsilon_c - \varepsilon_\infty)2\pi f\tau}{1 + (2\pi f\tau)^2},$$

де  $\varepsilon_c$  – статична діелектрична проникність;  $\varepsilon_\infty = 1$  – високочастотна діелектрична проникність;  $\tau$  – час діелектричної релаксації, для води  $10^{-11}$  с.

При дуже великій частоті змін  $\vec{E}$  молекули води не встигатимуть приймати впорядковане положення і в цьому випадку  $P_e = 0$ , отже,  $\varepsilon' = 1$ , а  $\varepsilon'' = 0$  (рисунок 2.1).

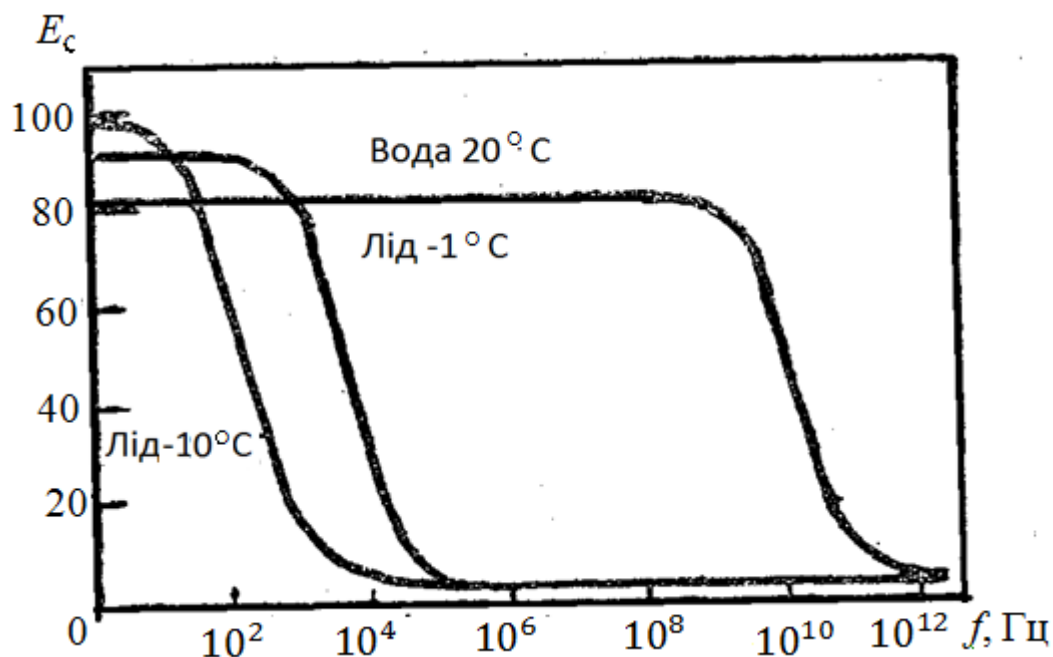


Рисунок 2.1 – Залежність діелектричної проникності від частоти коливань електричного поля

Уявна складова діелектричної проникності характеризує поглинання енергії електричного поля в воді, і для оцінки її відносної ролі вводиться кут діелектричних втрат  $\text{tg}\delta = \epsilon''/\epsilon'$ .

Діелектрична проникність залежить від температури води. При її підвищенні зменшується в'язкість води і посилюється тепловий рух молекул. Перший фактор створює більш сприятливі умови для дипольної орієнтації молекул під впливом зовнішнього електричного поля, що призводить до зростання  $\chi_e$  отже, і  $\epsilon$ . Другий фактор перешкоджає упорядкуванню орієнтації диполів і зменшує  $\chi_e$  і  $\epsilon$ . При відносно малих частотах змін  $\vec{E}$  переважає роль теплового руху молекул, а при великих – в'язкості. Тому при малих  $f$  відбувається зменшення  $\epsilon$  з ростом температури, а при великих – зростання  $\epsilon$ .

У слабо концентрованих розчинах солей, яким є морська вода, діелектрична сприйнятливність з ростом солоності трохи зменшується, так як іони солей концентрують навколо себе дипольні молекули води, перешкоджаючи упорядкуванню орієнтації диполів. Це призводить до зменшення  $\epsilon'$ . Одночасно

відбувається посилення поглинання електромагнітного поля і збільшення зсуву по фазі вектора  $\vec{P}_e$ , що викликає зростання  $\varepsilon''$  (рисунок 2.2).

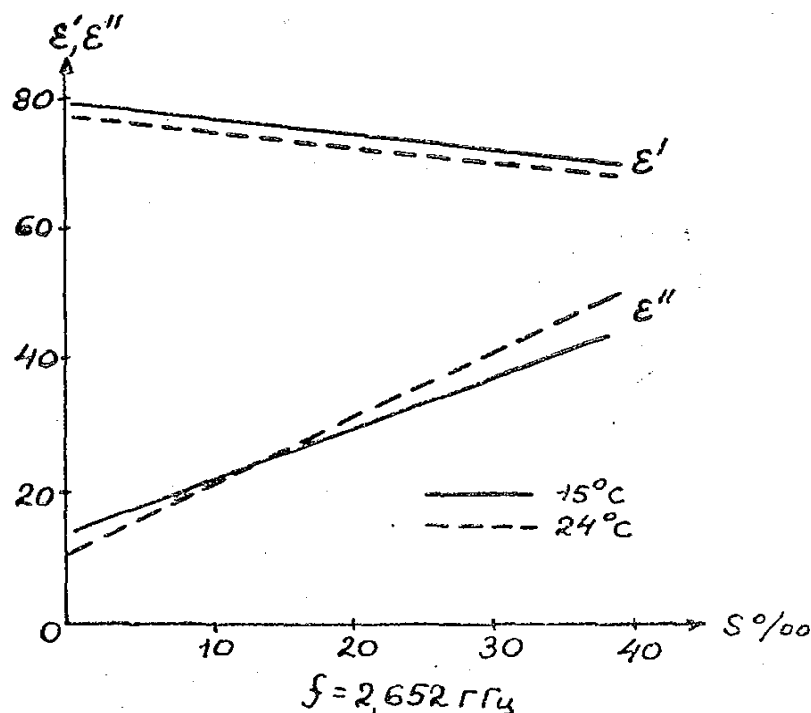


Рисунок 2.2 – Залежність діелектричної проникності  $\varepsilon'$  та  $\varepsilon''$  морської води від солоності при  $f = 2,652$

Замість діелектричної проникності можна користуватися показником заломлення  $n$  і показником поглинання  $k$ , енергії електричних хвиль в воді:

$$n + ik = \sqrt{\varepsilon' + i\varepsilon''}.$$

Питома електропровідність морської води  $\gamma$  (См/м) є величиною, зворотною питомому електричному опору, і характеризує співвідношення між напруженістю електричного поля і щільністю струму  $\vec{j}$ :

$$\vec{j} = \gamma \vec{E}.$$

Вона, в основному, залежить від концентрації і рухливості іонів в воді: протонів  $H^+$ , гідроксиду  $OH^-$  і вільних іонів розчинених солей. Концентрація іонів збільшується з ростом солоності  $S$  і тому  $\gamma$  зростає зі збільшенням  $S$  (рисунок 2.3).

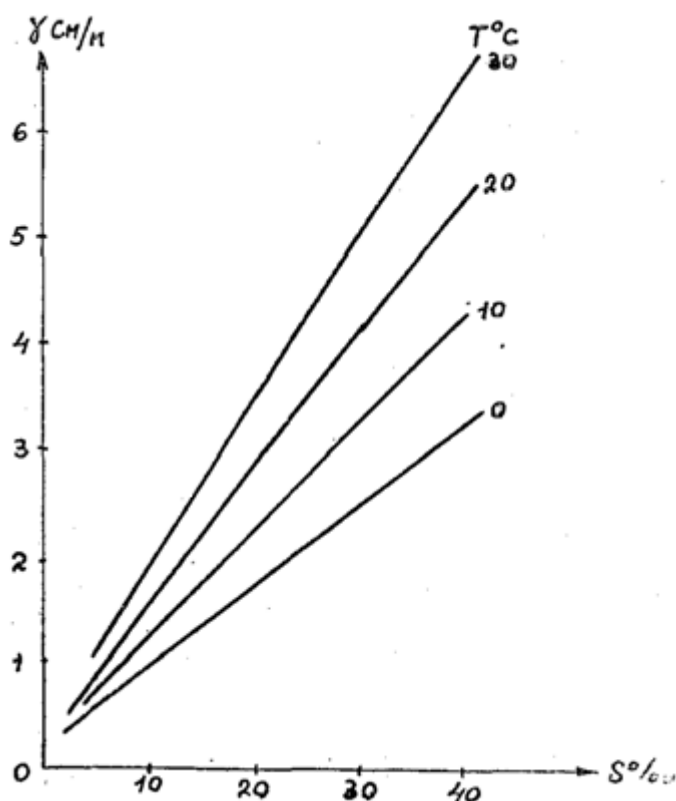


Рисунок 2.3 – Залежність електропровідності морської води від солоності

Рухливість іонів різна. Наприклад, у іонів  $H^+$  і  $OH^-$  вона різниться в два рази. Тому  $\gamma$  залежить від співвідношення іонів різних солей, і в морях, в яких сольовий склад відмінний від океанічного, електропровідність при інших рівних умовах буде різною.

Рухливість іонів, а отже, і електропровідність, збільшуються з ростом температури (рисунок 2.4). При цьому відбувається як зростання власної швидкості іонів, так і зменшення в'язкості води і збільшення ступеня дисоціації солей.

Електропровідність води дещо збільшується зі зростанням тиску (рисунок 2.5). Вважається, що при цьому відбувається зменшення в'язкості води, деяке збільшення концентрації іонів, а також зменшення розміру іона.

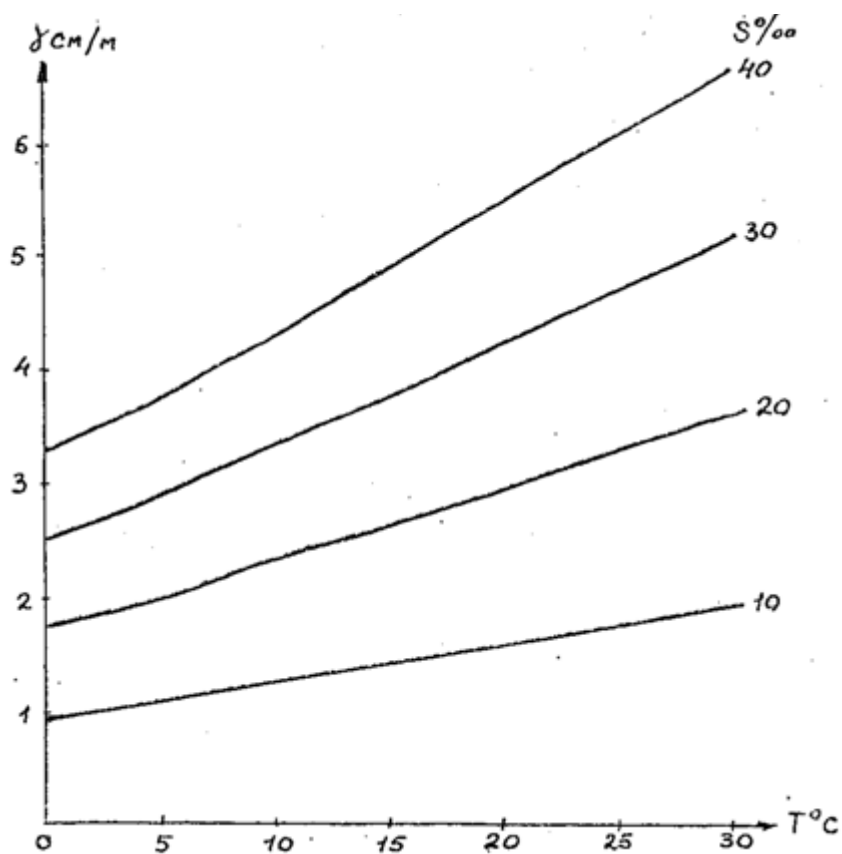


Рисунок 2.4 – Залежність електропровідності морської води від температури

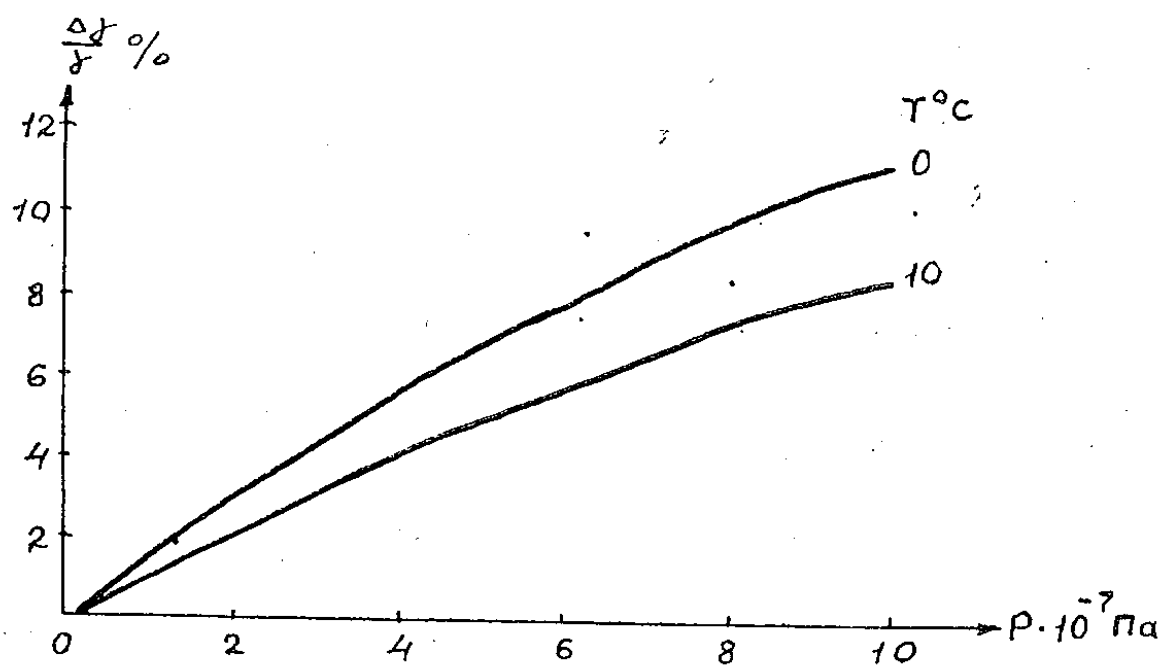


Рисунок 2.5 – Зміна електропровідності морської води від тиску

Велика концентрація іонів в морській воді призводить до того, що її питома електропровідність виявляється високою, складаючи в океані 3-7 См/м. У дистильованій воді  $\gamma$  складає всього  $2 \cdot 10^{-4}$  См/м.

Залежність  $\gamma$  від солоності, температури і тиску виражається емпіричними формулами типу:

$$\gamma = aT + bS + cTS + d.$$

Константи, визначені для діапазону температур 7-30 °С та солоності 24-38 ‰ мають наступні значення:

$$a = 4 \cdot 10^{-2} \text{ См/(м} \cdot \text{К)}; b = 7,9 \cdot 10^{-2} \text{ См/(м} \cdot \text{‰)};$$

$$c = 2,2 \cdot 10^{-3} \text{ См/(м} \cdot \text{К} \cdot \text{‰)}; d = -3 \cdot 10^{-2} \text{ См/м}.$$

Залежність питомої електропровідності морської води від солоності використовується для визначення солоності, так як  $\gamma$  легко вимірюється в природних умовах за допомогою спеціальних приладів-солемірів. Додатково при визначенні солоності по електропровідності треба знати температуру і тиск в точці вимірювання  $\gamma$ .

Значення  $\gamma$  можуть використовуватися для характеристики водних мас в океані, так як цей показник враховує в собі температуру, солоність і тиск.

Магнітне поле за аналогією з електричним характеризується напруженістю  $\vec{H}$  (А/м). Часто ще в якості одиниці напруженості використовується ерстед, рівний  $1000/4\pi$  А/м. За відсутності електромагнітного поля вода не має макромагнітного моменту, тобто вона є діамагнітною речовиною. Під впливом зовнішнього магнітного поля молекули і іони набувають наведені магнітні моменти. Відбувається намагнічування води, що характеризується середнім в елементарному обсязі магнітним моментом – вектором намагніченості  $\vec{P}_m$  (А/м). Він залежить від складу води і в природних умовах пропорційний напруженості зовнішнього магнітного поля:

$$\vec{P}_m = \chi_m \vec{H}.$$

Безрозмірний коефіцієнт пропорційності  $\chi_m$  називається магнітною сприйнятливістю.

Наведене магнітне поле в діамагнетиках екранує зовнішнє поле, послаблюючи його. Вода намагнічується слабо. Тому коефіцієнт  $\chi_m$  негативний і малий за величиною (при  $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$   $\chi_m = -12,97 \cdot 10^{-6}$ ), від температури, солоності і тиску він залежить слабо.

Сумарне магнітне поле в океані характеризується вектором магнітної індукції  $\vec{B}$  (Тл):

$$\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{P}_m).$$

Внаслідок різної розмірності в системі СІ величин  $\vec{B}$ ,  $\vec{H}$ ,  $\vec{P}_m$  вводиться магнітна постійна  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м, що погоджує праву і ліву сторони формули. Формулу вектора магнітної індукції також можна записати у вигляді:

$$\vec{B} = \mu_0 \mu \vec{H},$$

де  $\mu = (1 + \chi_m)$  – магнітна проникність. Через малу величину  $\chi_m$  магнітна проникність морської води  $\mu \approx 1$ .

## 2.2. Програмне забезпечення для аналізу магнітного поля

ANSYS Maxwell – це сучасне, високопродуктивне програмне забезпечення для моделювання двовимірних і тривимірних електромагнітних полів, що використовується для аналізу моделей двигунів, датчиків, трансформаторів і багатьох інших електричних і електромеханічних пристроїв різного застосування. Математична основа ANSYS Maxwell - метод кінцевих елементів, завдання якого полягає в знаходженні єдино можливого розподілу електромагнітного поля в заданій розрахунковій області при зазначених граничних умовах.

ANSYS Maxwell застосовується для розробки різних електромеханічних вузлів в електромашинобудуванні, автомобільній, оборонній, авіакосмічній галузях (рисунок 2.6). Робота з віртуальними моделями, замість дорогих натурних експериментів має чітку економічну обґрунтованість. Області застосування:

- Електромеханіка: двигуни і генератори, поступальні й обертові електромагніти, реле, мікроелектромеханічні пристрої.

- Електромагнетизм: котушки індуктивності, постійні магніти, датчики, кабелі.
- Силова електроніка: трансформаторна техніка, перетворювачі, IGBT транзистори і багато інших пристроїв.
- Поведінка електромагнітних полів: вивчення екранування, електростатичні завдання, електромагнітна сумісність, напівпровідники, бездротова передача енергії.
- Міждисциплінарні завдання: магнітне переміщення, індукційний нагрів, аналіз вібрації і акустики в електричних машинах.

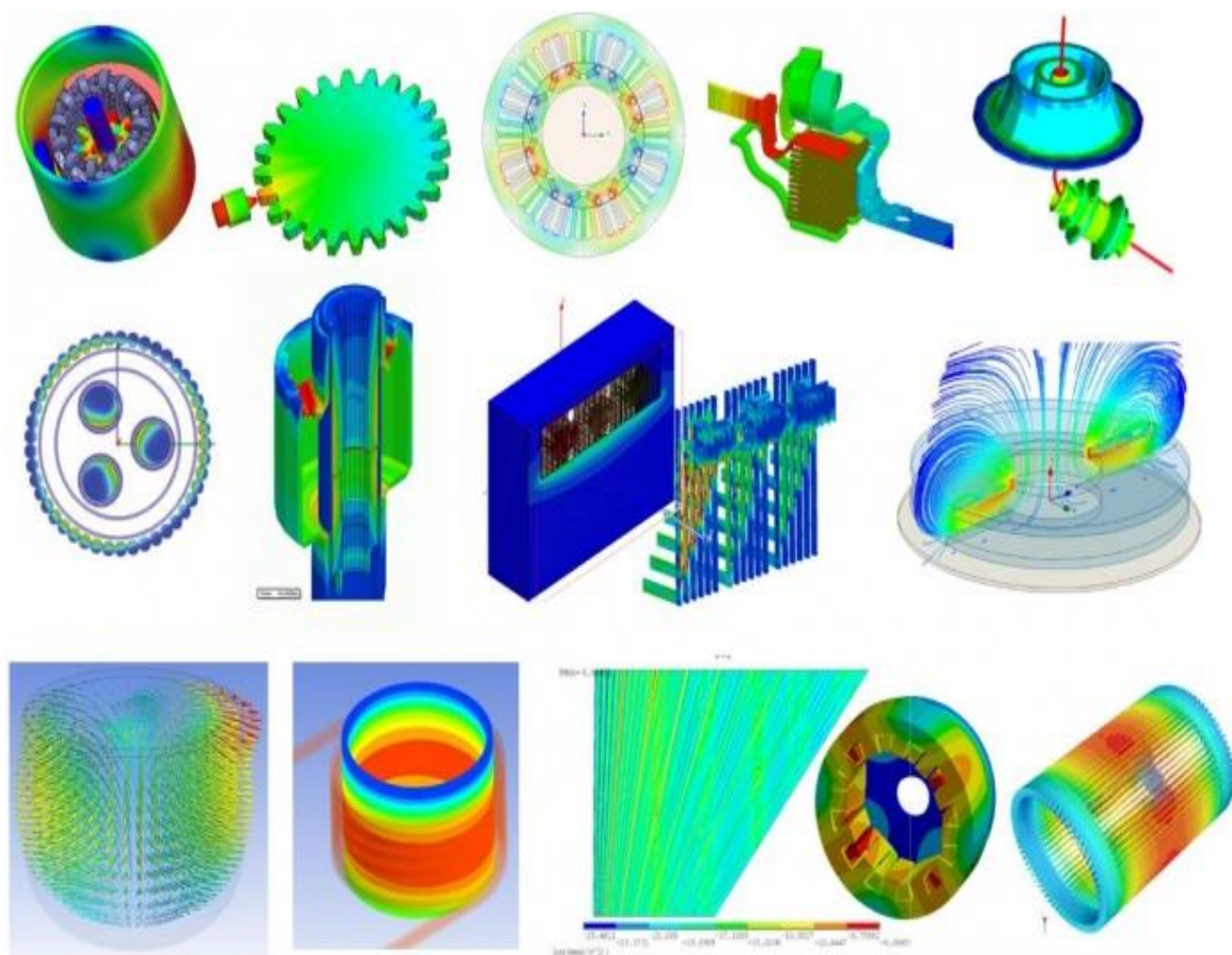


Рисунок 2.6 – Приклади застосування ANSYS Maxwell

ANSYS Maxwell оснащений вбудованим графічним редактором, функціонал якого в повній мірі забезпечує потреби користувача на етапі підготовки моделі для розрахунку.

- Імпорт геометричної CAD-моделі з усіх сучасних пакетів тривимірного моделювання.

- База примітивів: прямокутник, окружність, паралелепіпед, циліндр, конус, сфера, тор.

- Можливість створення геометричних моделей зверху-вниз (операції з геометричними примітивами) і знизу-вгору (точки, лінії, поверхні, об'єми).

- Операції над геометричними об'єктами (додавання, віднімання, перетин і т.д.).

- Можливість злиття декількох геометричних об'єктів в один.

- Параметричне завдання геометрії.

- Перевірка на наявність малих геометричних об'єктів, сингулярностей і багато чого іншого з можливістю візуального контролю.

- Інструменти вимірювання геометричних об'єктів: запит обсягу, площі поверхні, довжини лінії.

- ANSYS Maxwell має набір примітивів, який використовується для спрощення створення і параметризації моделей електричних машин і трансформаторів: елементи статорів, роторів, магнітопроводів, елементи обмоток, корпуси електричних машин (рисунок 2.7).

ANSYS Maxwell підтримує наступні типи завдань в лінійних і нелінійних середовищах, плоскопаралельних, осесиметричних, тривимірних постановках:

- Магнітостатика. Магнітні поля, викликані поширенням щільності постійного струму в провідниках, постійними магнітами, а також завдання з зовнішніми постійними магнітними полями.

- Гармонійні поля. Сталі електромагнітні поля з індукованими вихровими струмами в провідних частинах моделі, викликані поширенням змінних струмів в провідниках (однакової частоти, різних за фазами). Джерелом магнітного поля може бути зовнішнє змінне електромагнітне поле. Вирішення гармонійного

магнітного завдання – це повне хвильове рішення, що включає ефекти електромагнітного хвильового випромінювання. Цей тип застосовується для вирішення електромагнітних завдань, де значний внесок в роботу моделі вносять поверхневий ефект індукованих струмів і ефект близькості.

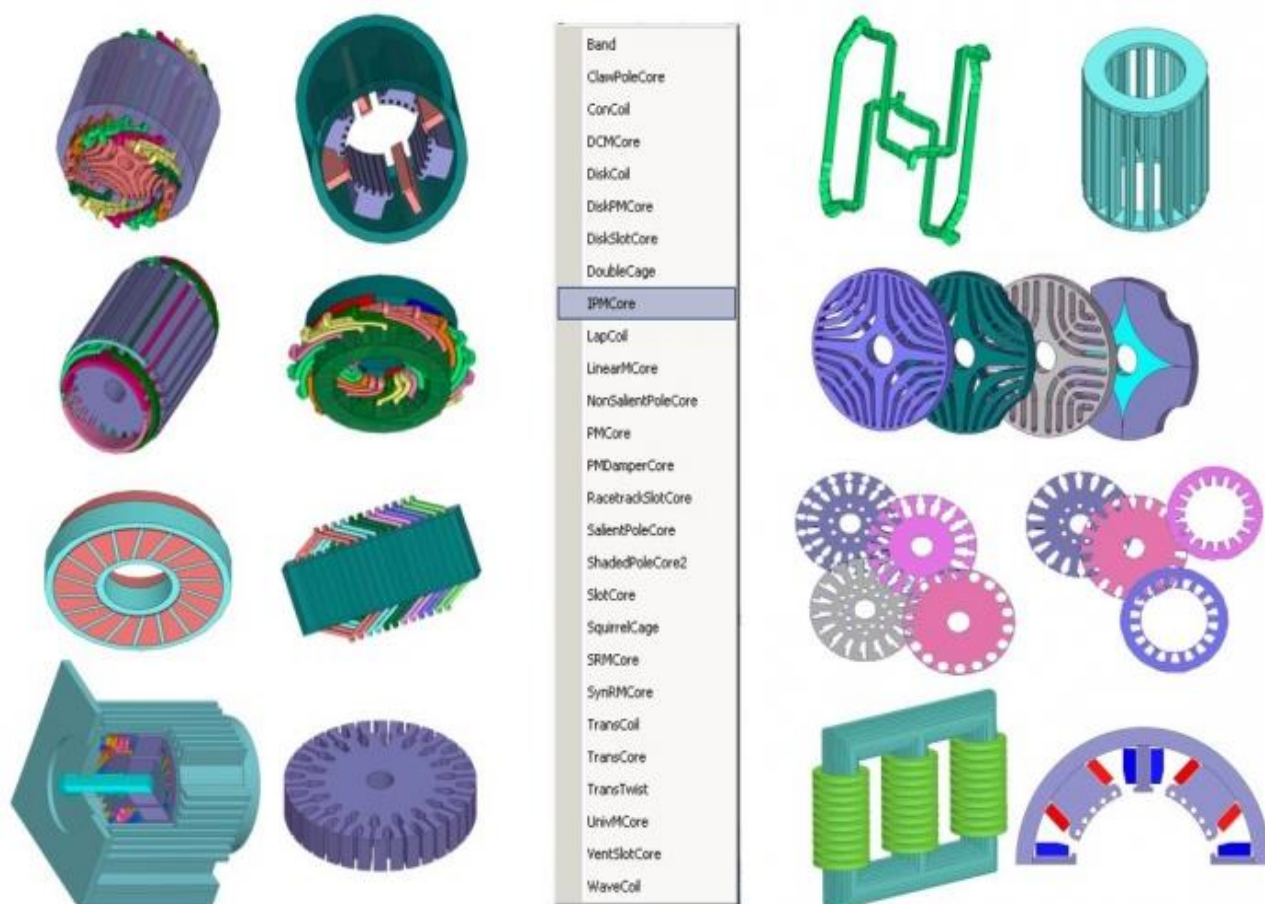


Рисунок 2.7 – Геометричні моделі, створені за допомогою примітивів в ANSYS Maxwell

- Нестационарне магнітне поле. Розглядається перехідний процес в електромеханічних системах, викликаний постійними магнітами і струмопровідними обмотками, джерелами напруги або струму з довільною зміною в часі. Обмотки можуть бути підключені до електричних кіл управління ANSYS Maxwell Circuit Editor або ANSYS Simplorer. У цьому типі рішення можливо розглядати ефекти обертального або поступального руху елементів моделі в магнітному полі з урахуванням наведених вихрових струмів.

- Електричні поля. Можуть відноситися до однієї з трьох категорій: електростатичні поля в діелектриках, викликані напругою і зарядами; електричні поля в провідниках, що описуються просторовим поширенням напруги, електричного поля і щільності постійного струму; комбінація попередніх двох варіантів з рішеннями по полю в провідниках, як початкові умови для електростатичної задачі (рисунок 2.8).

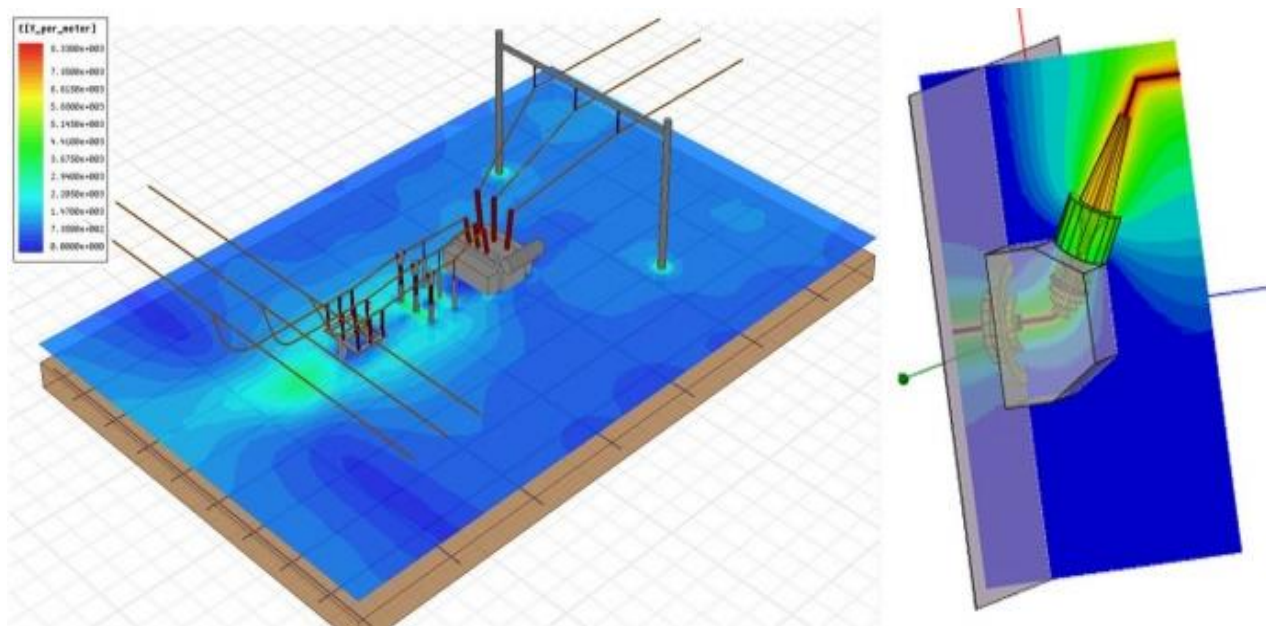


Рисунок 2.8 – Приклад вирішення електростатичної задачі

Аналіз розмагнічування в ANSYS Maxwell дозволяє працювати з характеристиками розмагнічування постійних магнітів, розширеними до третього квадранта. Зовнішні магнітні поля і підвищена температура можуть змінити магнітні властивості магнітотвердих матеріалів і призвести до їх часткового розмагнічування. ANSYS може комбінувати ці ефекти для точного визначення продуктивності електромеханічних пристроїв.

Для визначення втрат в сталі ANSYS Maxwell використовує наступні методи:

- Аналітичний підхід до визначення втрат через рівняння Штейметца. Необхідно визначити коефіцієнти частин рівняння.

- Польовий метод, заснований на технології моделювання гістерезису. Необхідно визначити коерцитивної силу і основну криву намагнічування (рисунок 2.9).

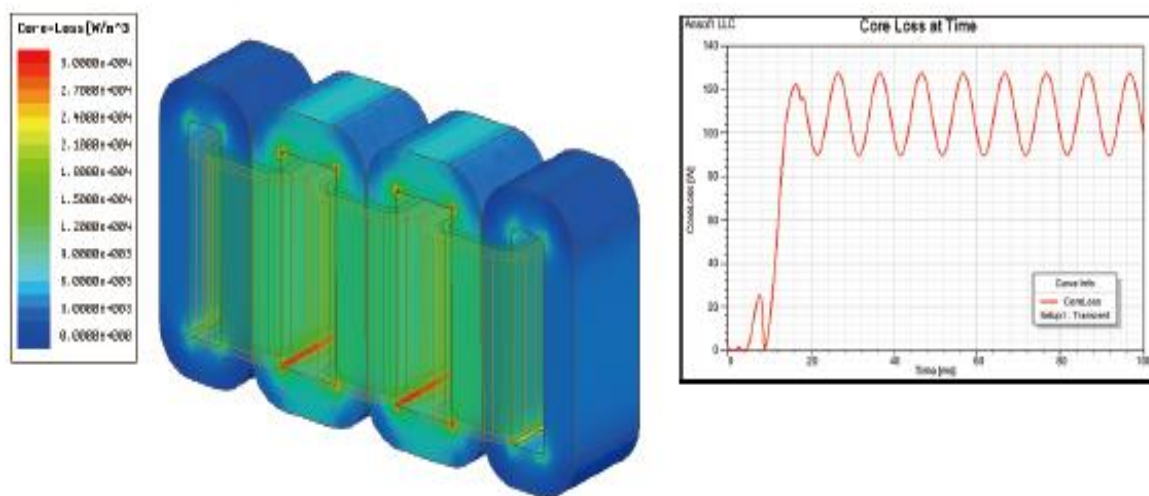


Рисунок 2.9 – Аналіз втрат в сталі трьохфазного трансформатора

### 2.3. Аналіз магнітних систем, які можна використати для МГД-пристроїв

Будемо розглядати три найпростіші магнітні системи:

- без магнітопроводу;
- з магнітопроводом без повітряних зазорів відносно аксіальних поверхонь магнітів;
- з магнітопроводом, що має повітряні зазори відносно аксіальних поверхонь магнітів.

Необхідно обрати найбільш оптимальний варіант. Для цього скористаємося вище згаданим програмним забезпеченням ANSYS Maxwell. Для кожної моделі проводимо розрахунок магнітної системи з відстанню між магнітами від 0,005 до 0,05 м. Висота магнітів становить 0,05 м, ширина – 0,005 м. Матеріал магнітів обираємо стандартний з бібліотеки програмного забезпечення – *NdFe35*.

Результати розрахунку магнітної системи без магнітопроводу представлені на рисунках 2.10 – 2.12.

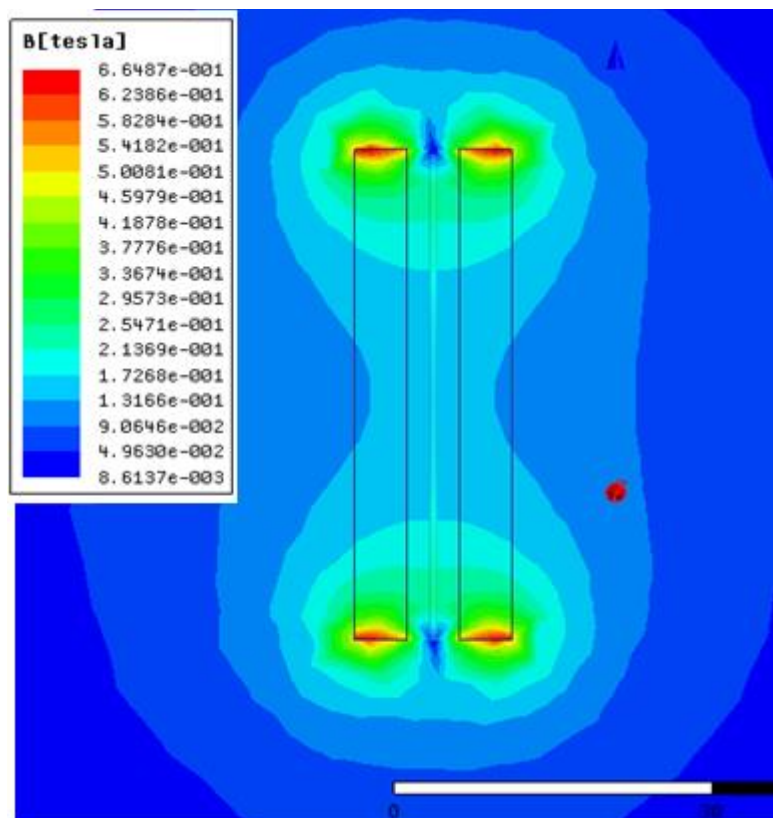


Рисунок 2.10 – Магнітна система без магнітопроводу з відстанню між магнітами  
0,005 м

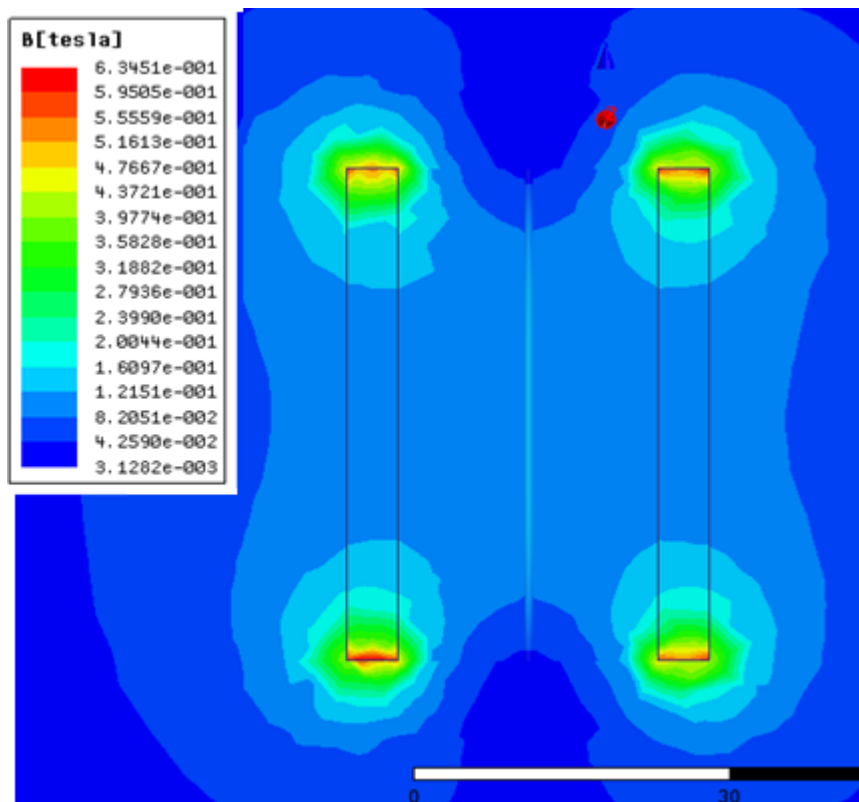


Рисунок 2.11 – Магнітна система без магнітопроводу з відстанню між магнітами  
0,025 м

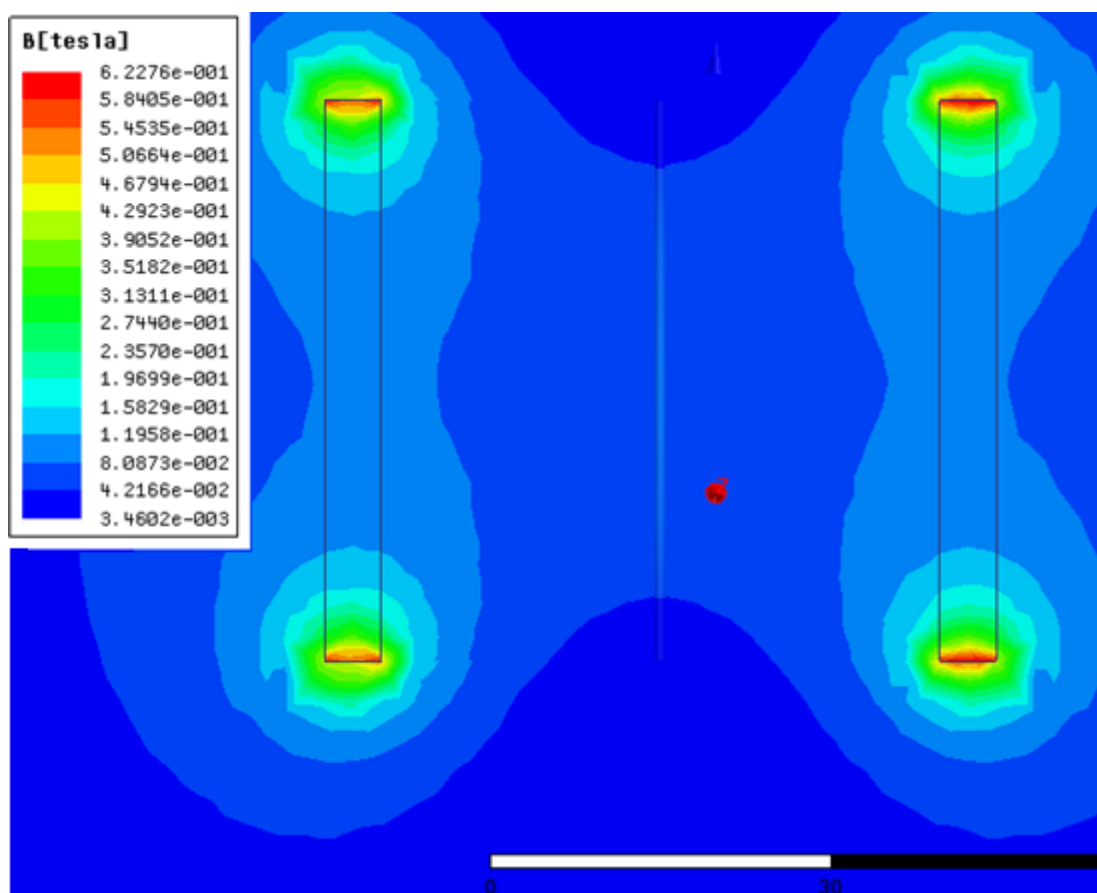


Рисунок 2.12 – Магнітна система без магнітопроводу з відстанню між магнітами 0,05 м

Результати розрахунків магнітної індукції для системи без магнітопроводу відносно середньої лінії та площини між магнітами наведені у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1

| $l, \text{ м}$ | $S, \text{ м}^2$ | $\frac{\int B_x dl}{l}, \text{ Тл}$ | $\int B_x dS, \text{ Тл} \cdot \text{ м}^2$ | $\frac{\int B_x dS}{S}, \text{ Тл}$ |
|----------------|------------------|-------------------------------------|---------------------------------------------|-------------------------------------|
| 0,005          | 0,00025          | 1,5101                              | 0,000044                                    | 0,176751                            |
| 0,01           | 0,0005           | 0,6977                              | 0,000074                                    | 0,148256                            |
| 0,015          | 0,00075          | 0,393                               | 0,000097                                    | 0,129436                            |
| 0,02           | 0,001            | 0,2562                              | 0,000114                                    | 0,114417                            |
| 0,025          | 0,00125          | 0,1801                              | 0,000129                                    | 0,103006                            |
| 0,03           | 0,0015           | 0,1333                              | 0,000141                                    | 0,093877                            |

|       |         |        |          |          |
|-------|---------|--------|----------|----------|
| 0,035 | 0,00175 | 0,1019 | 0,000150 | 0,085929 |
| 0,04  | 0,002   | 0,0801 | 0,000159 | 0,079705 |
| 0,045 | 0,00225 | 0,0643 | 0,000166 | 0,073842 |
| 0,05  | 0,0025  | 0,0525 | 0,000172 | 0,068926 |

Результати розрахунку магнітної системи з магнітопроводом без повітряних зазорів відносно аксіальних поверхонь магнітів представлені на рисунках 2.13-2.15.

Результати розрахунків магнітної індукції відносно середньої лінії та площини між магнітами для системи з магнітопроводом без повітряних зазорів відносно аксіальних поверхонь магнітів наведені у таблиці 2.2.

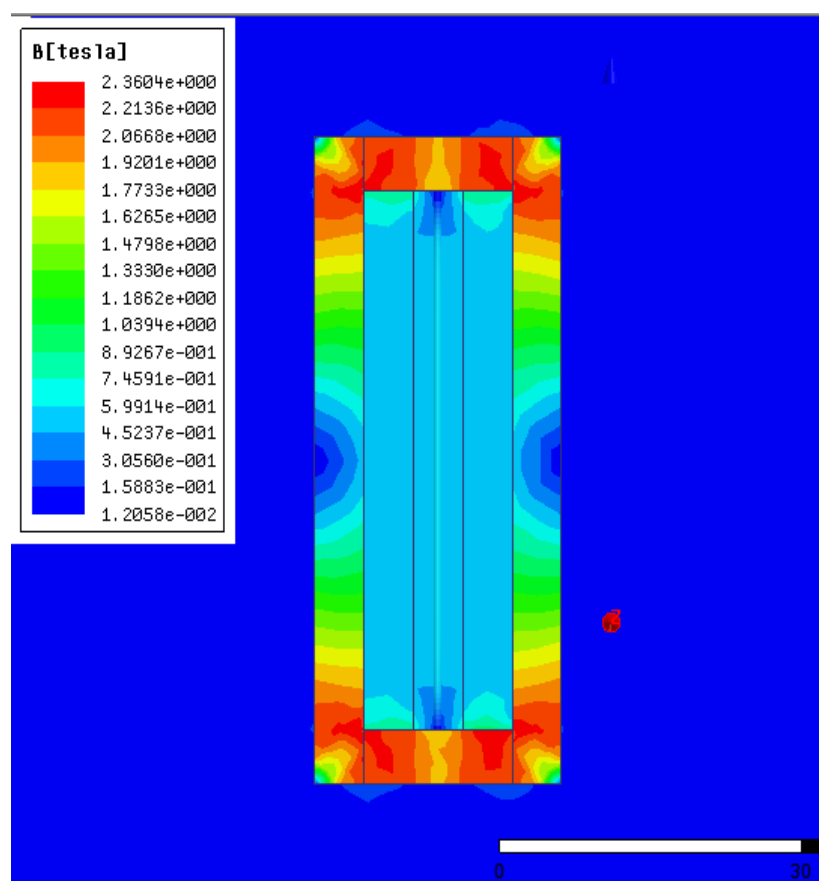


Рисунок 2.13 – Магнітна система з магнітопроводом без повітряних зазорів відносно аксіальних поверхонь магнітів з відстанню між магнітами 0,005 м

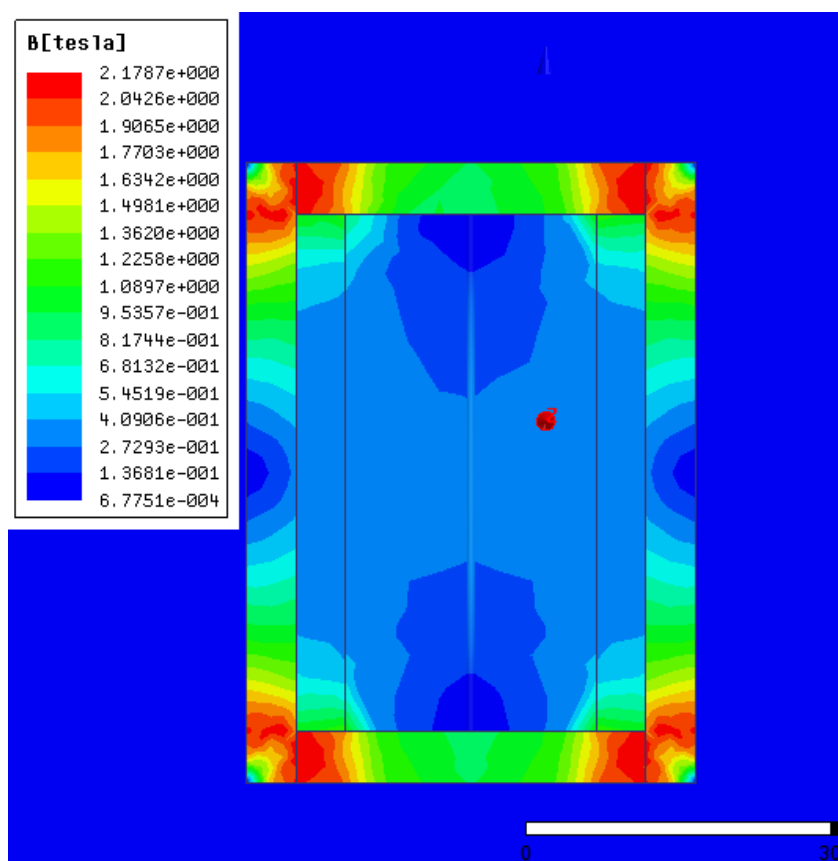


Рисунок 2.14 – Магнітна система з магнітопроводом без повітряних зазорів відносно аксіальних поверхонь магнітів з відстанню між магнітами 0,025 м

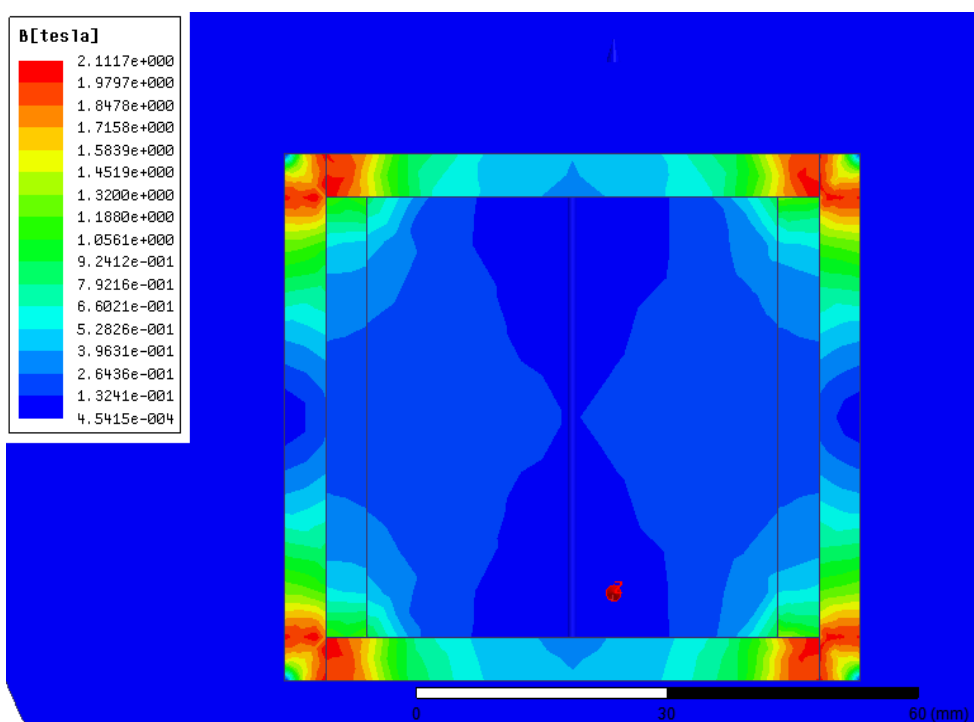


Рисунок 2.15 – Магнітна система з магнітопроводом без повітряних зазорів відносно аксіальних поверхонь магнітів з відстанню між магнітами 0,05 м

Таблиця 2.2

| $l, \text{ м}$ | $S, \text{ м}^2$ | $\frac{\int B_x dl}{l}, \text{ ТЛ}$ | $\int B_x dS, \text{ ТЛ} \cdot \text{ м}^2$ | $\frac{\int B_x dS}{S}, \text{ ТЛ}$ |
|----------------|------------------|-------------------------------------|---------------------------------------------|-------------------------------------|
| 0,005          | 0,00025          | 4,6514                              | 0,000120                                    | 0,478697                            |
| 0,01           | 0,0005           | 1,8698                              | 0,000199                                    | 0,397408                            |
| 0,015          | 0,00075          | 1,0189                              | 0,000250                                    | 0,333980                            |
| 0,02           | 0,001            | 0,6270                              | 0,000285                                    | 0,285312                            |
| 0,025          | 0,00125          | 0,4143                              | 0,000309                                    | 0,247064                            |
| 0,03           | 0,0015           | 0,2887                              | 0,000325                                    | 0,216586                            |
| 0,035          | 0,00175          | 0,2073                              | 0,000334                                    | 0,191063                            |
| 0,04           | 0,002            | 0,1524                              | 0,000343                                    | 0,171558                            |
| 0,045          | 0,00225          | 0,1143                              | 0,000349                                    | 0,154918                            |
| 0,05           | 0,0025           | 0,087                               | 0,000352                                    | 0,140964                            |

Результати розрахунку магнітної системи з магнітопроводом, що має повітряні зазори відносно аксіальних поверхонь магнітів представлені на рисунках 2.16 – 2.18.

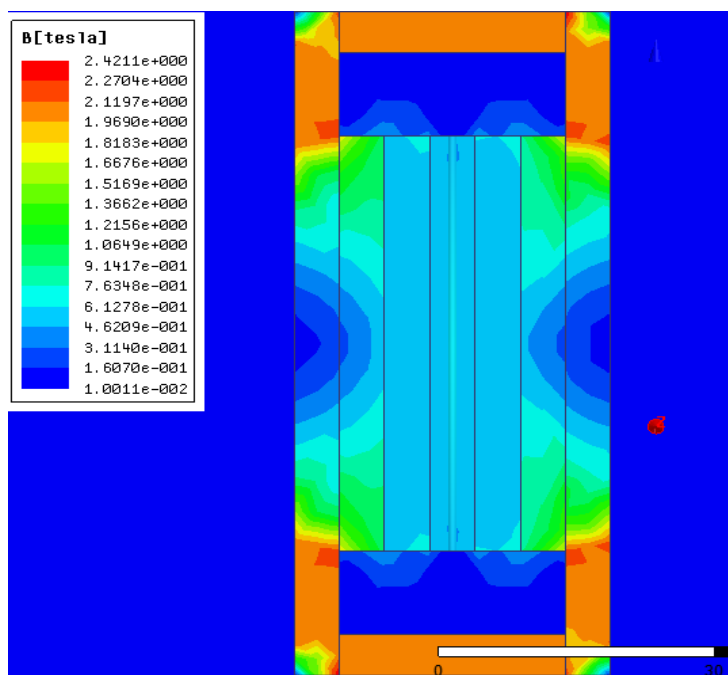


Рисунок 2.16 – Магнітна система з магнітопроводом, що має повітряні зазори відносно аксіальних поверхонь магнітів з відстанню між магнітами 0,005 м

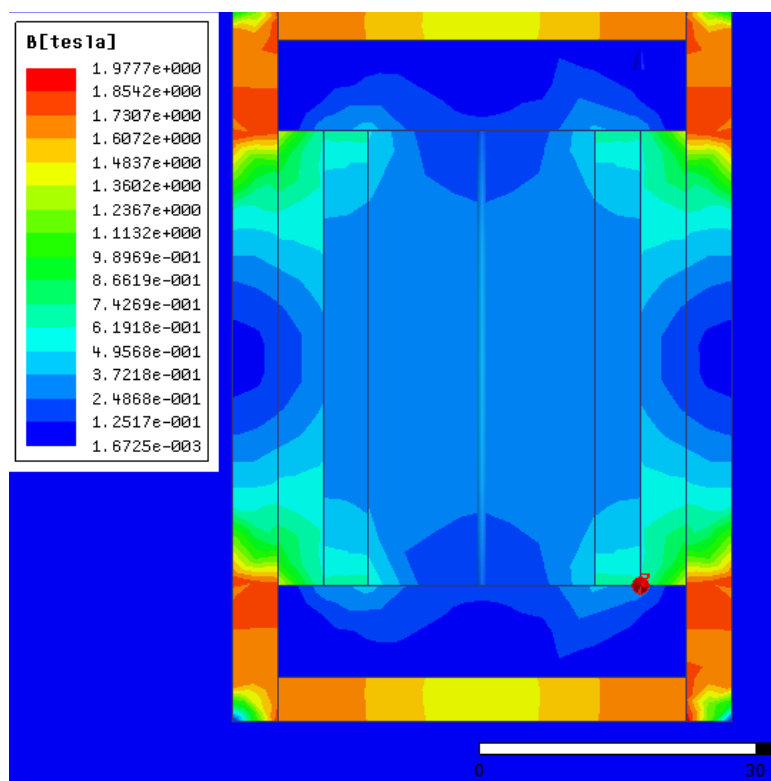


Рисунок 2.17 – Магнітна система з магнітопроводом, що має повітряні зазори відносно аксіальних поверхонь магнітів з відстанню між магнітами 0,025 м

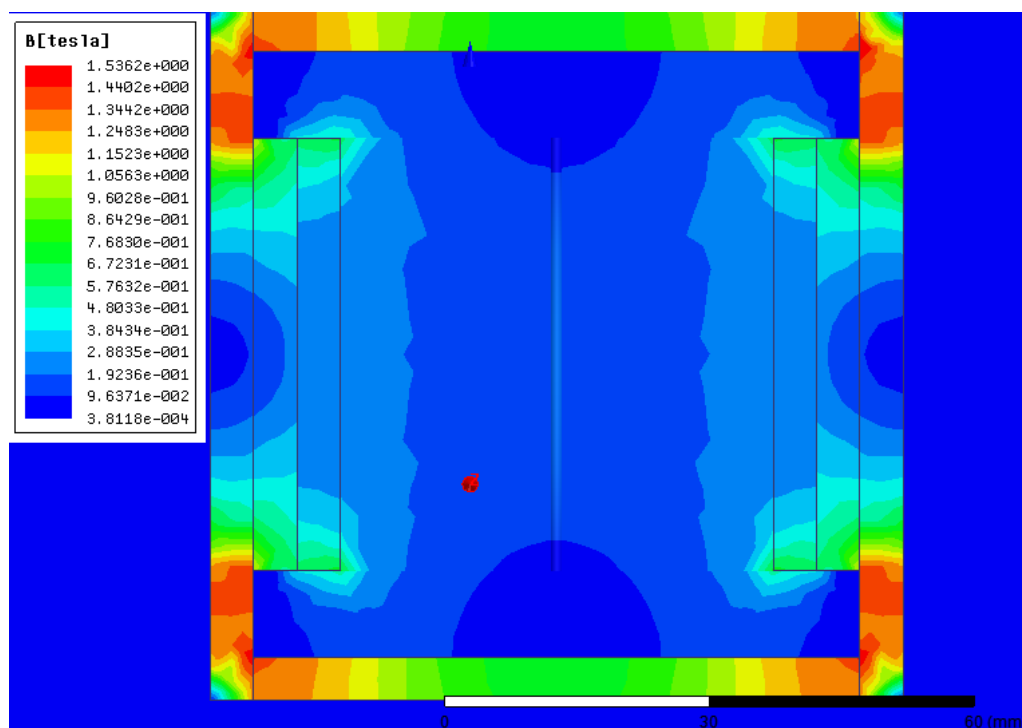


Рисунок 2.18 – Магнітна система з магнітопроводом, що має повітряні зазори відносно аксіальних поверхонь магнітів з відстанню між магнітами 0,05 м

Результати розрахунків магнітної індукції відносно середньої лінії та площини між магнітами для системи, що має повітряні зазори відносно аксіальних поверхонь магнітів наведені у таблиці 2.3.

Таблиця 2.3

| $l, \text{м}$ | $S, \text{м}^2$ | $\frac{\int B_x dl}{l}, \text{ТЛ}$ | $\int B_x dS, \text{ТЛ} \cdot \text{м}^2$ | $\frac{\int B_x dS}{S}, \text{ТЛ}$ |
|---------------|-----------------|------------------------------------|-------------------------------------------|------------------------------------|
| 0,005         | 0,00025         | 5,0527                             | 0,000128                                  | 0,510331                           |
| 0,01          | 0,0005          | 2,1259                             | 0,000218                                  | 0,436162                           |
| 0,015         | 0,00075         | 1,2003                             | 0,000281                                  | 0,374897                           |
| 0,02          | 0,001           | 0,7774                             | 0,000330                                  | 0,330129                           |
| 0,025         | 0,00125         | 0,5326                             | 0,000361                                  | 0,288702                           |
| 0,03          | 0,0015          | 0,3819                             | 0,000382                                  | 0,254659                           |
| 0,035         | 0,00175         | 0,2828                             | 0,000394                                  | 0,225051                           |
| 0,04          | 0,002           | 0,2149                             | 0,000404                                  | 0,201875                           |
| 0,045         | 0,00225         | 0,1667                             | 0,000411                                  | 0,182611                           |
| 0,05          | 0,0025          | 0,1317                             | 0,000415                                  | 0,166171                           |

За результатами таблиць 2.1, 2.2, 2.3 побудуємо наступні залежності:  $\frac{\int B_x dl}{l} = f(l)$ ;  $\int B_x dS = f(l)$ ;  $\frac{\int B_x dS}{S} = f(l)$ , які представлені на рисунках 2.19 – 2.21. На кожному рисунку представлені три графіки, які відповідають наступним магнітним системам: 1 – магнітна система без магнітопроводу; 2 – магнітна система з магнітопроводом без повітряних зазорів відносно аксіальних поверхонь магнітів; 3 – магнітна система з магнітопроводом, що має повітряні зазори відносно аксіальних поверхонь магнітів.

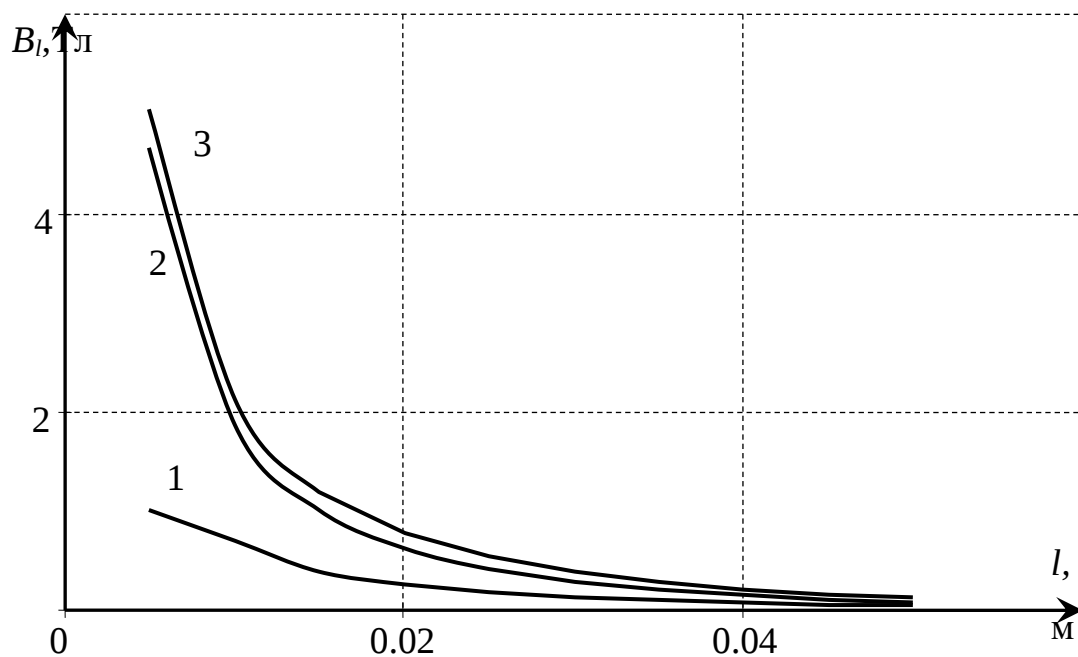


Рисунок 2.19 – Залежності  $\frac{\int B_x dl}{l} = f(l)$  для досліджуваних магнітних систем

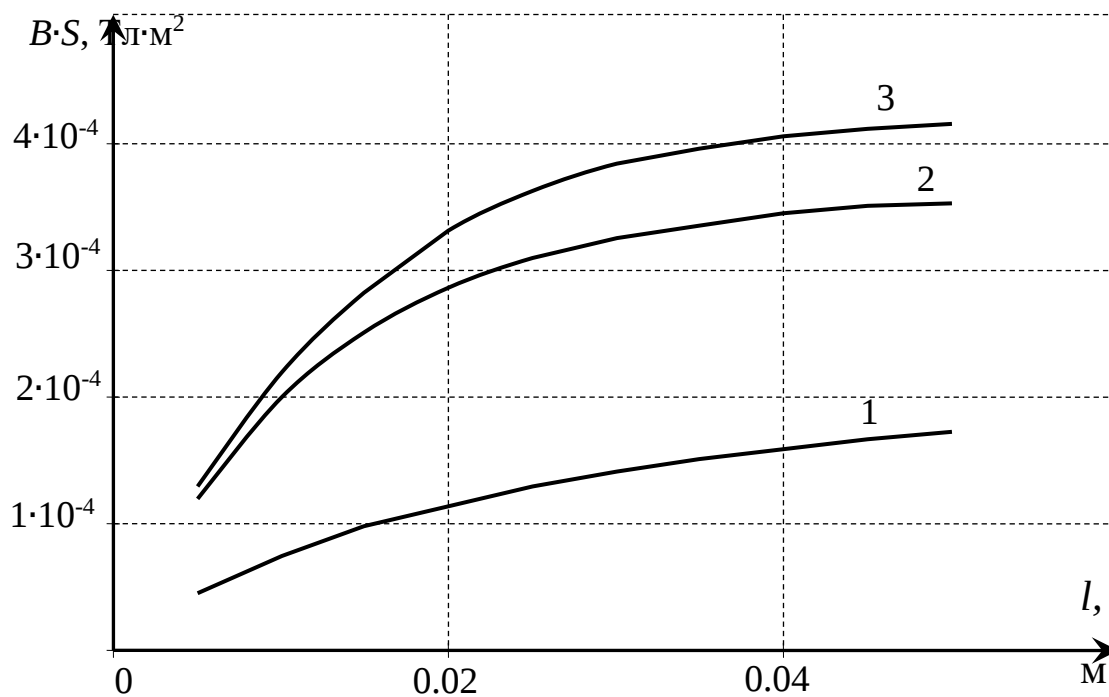


Рисунок 2.20 – Залежності  $\int B_x dS = f(l)$  для досліджуваних магнітних систем

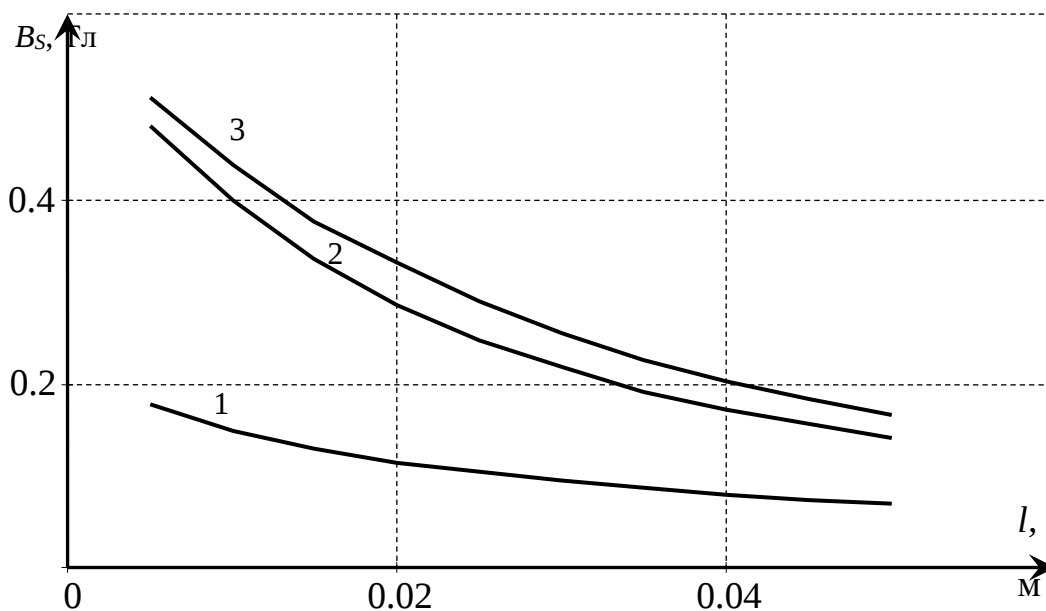


Рисунок 2.21 – Залежності  $\frac{\int B_x dS}{S} = f(l)$  для досліджуваних магнітних систем

За даними розрахунків та отриманих графіків можна зробити висновок, що найбільш оптимальним варіантом є магнітна система з магнітопроводом без повітряних зазорів відносно аксіальних поверхонь магнітів та відстанню між магнітами 0,025 м. Магнітна система без магнітопроводу має низькі показники магнітної індукції, а магнітна система з магнітопроводом, що має повітряні зазори відносно аксіальних поверхонь магнітів має кращі показники магнітної індукції, але ці значення не вагомо перевищують обрану систему за рахунок перевитрати сталі для її виготовлення.

Графік магнітної індукції відносно середньої лінії для магнітної системи з магнітопроводом без повітряних зазорів відносно аксіальних поверхонь магнітів та відстанню між магнітами 0,025 м представлений на рисунку 2.22.

Креслення обраної магнітної системи представлено на рисунку 2.23. На кресленні показано: 1 – ізоляція зовнішнього контуру; 2 – ізоляція внутрішнього контуру; 3 – магнітопровід (сталь); 4 – магніти; 5 – електроди (мідь).

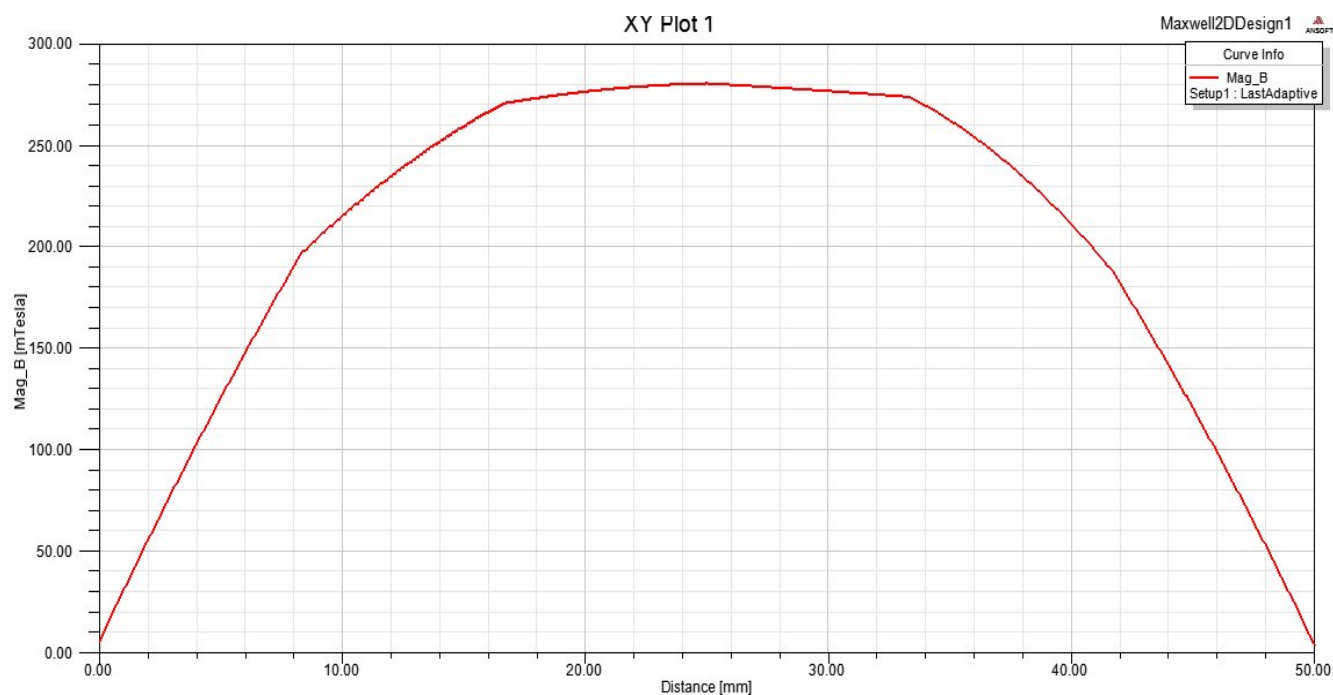


Рисунок 2.22 – Графік магнітної індукції відносно середньої лінії

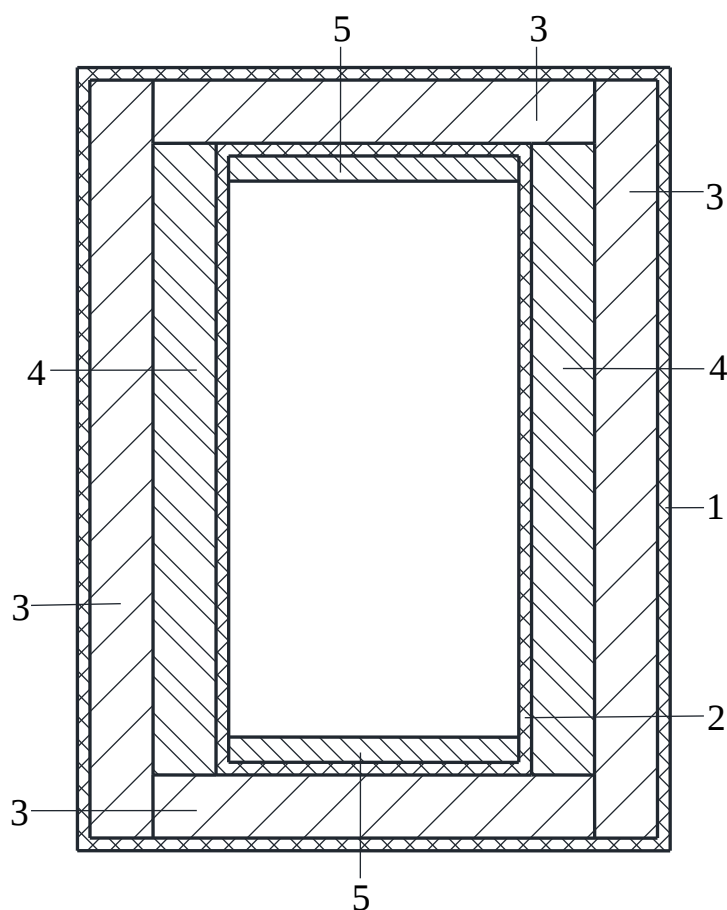


Рисунок 2.23 – Креслення магнітної системи з магнітопроводом без повітряних зазорів відносно аксіальних поверхонь магнітів та відстанню між магнітами 0,025 м

Необхідно розрахувати тиск, швидкість води та ККД досліджуваної магнітної системи. Для цього скористаємося наступними формулами.

Зобразимо МГД-канал у вигляді паралелепіпеда з довжиною  $l$ , висотою  $h$  та шириною  $b$  (рисунок 2.24).

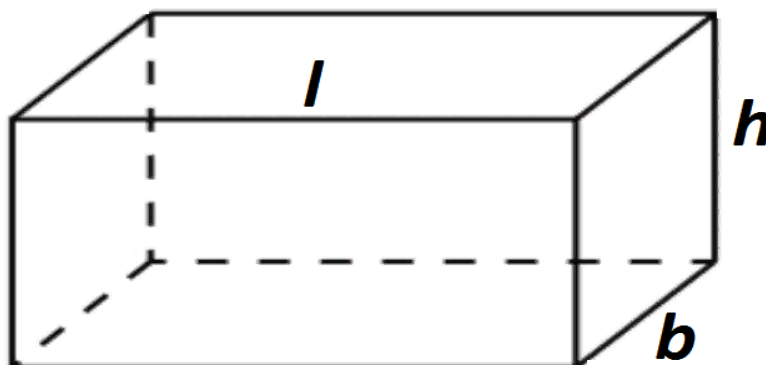


Рисунок 2.24 – Геометрична модель для розрахунку МГД-каналу

Тиск, який створюється в каналі МГД-ефектом, Па:

$$\Delta P_d = j \cdot B \cdot l,$$

де  $j$  – густина струму, А/м<sup>2</sup>;  $B$  – магнітна індукція, Тл;  $l$  – довжина каналу, м.

Швидкість руху води в каналі визначаємо з міркувань, що вся потенційна енергія збільшення тиску за вирахуванням втрат тертя перетворюється в кінетичну енергію:

$$\Delta P \cdot v_{\text{МВ}} = (\Delta P_d - \Delta P_{\text{тр}}) \cdot v_{\text{МВ}} = \frac{m \cdot v^2}{2} = \frac{\rho \cdot v_{\text{МВ}}}{2} \cdot v^2;$$

звідси

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta P}{\rho}}.$$

Опір тертя при стабілізованому ламінарному потоці, Па:

$$\Delta P_{\text{тр}} = \xi \frac{l}{d_r} \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2},$$

де  $d_r = 2 \cdot \frac{h \cdot b}{h + b}$  – гідравлічний діаметр (формула справедлива тільки для прямокутника), м;  $\xi = (95,9 - 123,31x + 135,14x^2 - 50,89x^3)/Re$  – коефіцієнт

гідравлічного опору тертя;  $Re$  – число Рейнольдса;  $\chi = h/b$ ;  $\rho = 1025 \text{ кг/м}^3$  – густина морської води;  $v$  – швидкість руху води в МГД-каналі, м/с;  $h$  – висота МГД-каналу, м;  $b$  – ширина МГД-каналу, м.

Число Рейнольдса розраховується за формулою, в.о.:

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot d_r}{\eta},$$

де  $\eta$  – динамічна в'язкість рідини, для морської води  $\eta = 1,002 \text{ мПа}\cdot\text{с}$  при температурі  $20^\circ\text{C}$ .

Тоді за допомогою математичних операцій втрати тертя дорівнюють, Па:

$$\Delta P_{\text{тр}} = A \cdot l \cdot v,$$

де

$$A = \xi Re \cdot \frac{\eta}{2 \cdot d_r^2}.$$

Швидкість руху води в МГД-каналі, м/с:

$$\begin{aligned} v^2 &= \frac{2}{\rho} \cdot j \cdot B \cdot l - \frac{2}{\rho} \cdot A \cdot l \cdot v; \\ v^2 + \frac{2}{\rho} \cdot A \cdot l \cdot v - \frac{2}{\rho} \cdot j \cdot B \cdot l &= 0. \end{aligned}$$

Розв'язавши квадратне рівняння отримаємо формулу для знаходження швидкості потоку води в МГД-каналі. Так як швидкість не може бути від'ємною, то обираємо позитивний корінь квадратного рівняння:

$$v = \frac{\sqrt{l \cdot (l \cdot A^2 + 2 \cdot B \cdot \rho \cdot j) - l \cdot A}}{\rho}.$$

Знаючи швидкість потоку води в МГД-каналі визначаємо перепад тиску, Па:

$$\Delta P = \Delta P_d - \Delta P_{\text{тр}}.$$

Потужність потоку води, Вт:

$$P_2 = \Delta P \cdot h \cdot b \cdot v.$$

Електрична потужність, що підводиться, Вт:

$$P_1 = j^2 \cdot \rho_e \cdot h \cdot b \cdot l.$$

ККД МГД-установки, %:

$$\eta_{\text{мгд}} = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100\%.$$

Витрата води в МГД-каналі, л/с:

$$Q = v \cdot h \cdot b \cdot 10^3.$$

Використовуючи зазначені вище формули, розрахуємо магнітну систему з магнітопроводом без повітряних зазорів відносно аксіальних поверхонь магнітів. Вихідними даними є:  $\rho_e = 0,3$  Ом·м (питомий електричний опір);  $j_{\text{мідь}} = 5 \cdot 10^6$  А/м<sup>2</sup>;  $h = 0,05$  м. Значення відстані між магнітами ( $b$ ) та магнітної індукції ( $B$ ) використовуємо з таблиці 2.2. Розраховуємо магнітну систему для двох випадків довжини каналу –  $l_1 = 1$  м;  $l_2 = 0,5$  м; та для двох випадків густини струму морської води –  $j_{\text{мв1}} = 1000$  А/м<sup>2</sup>;  $j_{\text{мв2}} = 500$  А/м<sup>2</sup>. Отримані результати зведено в таблицю 2.4.

Таблиця 2.4

| а) $l_1 = 1$ м; $j_{\text{мв1}} = 1000$ А/м <sup>2</sup>   |          |           |                 |            |                         |           |
|------------------------------------------------------------|----------|-----------|-----------------|------------|-------------------------|-----------|
| $b$ , м                                                    | $P$ , Па | $v$ , м/с | $\Delta P$ , Па | $P_1$ , Вт | $\eta_{\text{мгд}}$ , % | $Q$ , л/с |
| 0,005                                                      | 478,697  | 0,587     | 176,646         | 75         | 0,035                   | 0,147     |
| 0,01                                                       | 397,408  | 0,757     | 293,376         | 150        | 0,074                   | 0,378     |
| 0,015                                                      | 333,98   | 0,746     | 285,078         | 225        | 0,071                   | 0,559     |
| 0,02                                                       | 285,312  | 0,708     | 257,084         | 300        | 0,061                   | 0,708     |
| 0,025                                                      | 247,064  | 0,668     | 228,497         | 375        | 0,051                   | 0,835     |
| 0,03                                                       | 216,586  | 0,63      | 203,221         | 450        | 0,043                   | 0,945     |
| 0,035                                                      | 191,063  | 0,594     | 180,822         | 525        | 0,036                   | 1,039     |
| 0,04                                                       | 171,558  | 0,564     | 163,299         | 600        | 0,031                   | 1,129     |
| 0,045                                                      | 154,918  | 0,537     | 148,043         | 675        | 0,027                   | 1,209     |
| 0,05                                                       | 140,964  | 0,513     | 135,115         | 750        | 0,023                   | 1,284     |
| б) $l_2 = 0,5$ м; $j_{\text{мв1}} = 1000$ А/м <sup>2</sup> |          |           |                 |            |                         |           |
| 0,005                                                      | 239,349  | 0,477     | 116,631         | 37,5       | 0,037                   | 0,119     |
| 0,01                                                       | 198,704  | 0,559     | 160,259         | 75         | 0,06                    | 0,28      |
| 0,015                                                      | 166,99   | 0,54      | 149,296         | 112,5      | 0,054                   | 0,405     |
| 0,02                                                       | 142,656  | 0,509     | 132,522         | 150        | 0,045                   | 0,509     |
| 0,025                                                      | 123,532  | 0,478     | 116,892         | 187,5      | 0,037                   | 0,597     |

|                                                              |         |       |         |        |       |       |
|--------------------------------------------------------------|---------|-------|---------|--------|-------|-------|
| 0,03                                                         | 108,293 | 0,449 | 103,524 | 225    | 0,031 | 0,674 |
| 0,035                                                        | 95,532  | 0,423 | 91,882  | 262,5  | 0,026 | 0,741 |
| 0,04                                                         | 85,779  | 0,402 | 82,838  | 300    | 0,022 | 0,804 |
| 0,045                                                        | 77,459  | 0,383 | 75,012  | 337,5  | 0,019 | 0,861 |
| 0,05                                                         | 70,482  | 0,365 | 68,401  | 375    | 0,017 | 0,913 |
| B) $l_1 = 1 \text{ m}; j_{\text{MB2}} = 500 \text{ A/m}^2$   |         |       |         |        |       |       |
| 0,005                                                        | 239,349 | 0,346 | 61,347  | 18,75  | 0,028 | 0,086 |
| 0,01                                                         | 198,704 | 0,503 | 129,568 | 37,5   | 0,087 | 0,251 |
| 0,015                                                        | 166,99  | 0,51  | 133,523 | 56,25  | 0,091 | 0,383 |
| 0,02                                                         | 142,656 | 0,49  | 123,121 | 75     | 0,08  | 0,49  |
| 0,025                                                        | 123,532 | 0,465 | 110,614 | 93,75  | 0,069 | 0,581 |
| 0,03                                                         | 108,293 | 0,439 | 98,967  | 112,5  | 0,058 | 0,659 |
| 0,035                                                        | 95,532  | 0,415 | 88,372  | 131,25 | 0,049 | 0,727 |
| 0,04                                                         | 85,779  | 0,395 | 79,998  | 150    | 0,042 | 0,79  |
| 0,045                                                        | 77,459  | 0,376 | 72,643  | 168,75 | 0,036 | 0,847 |
| 0,05                                                         | 70,482  | 0,36  | 66,382  | 187,5  | 0,032 | 0,9   |
| Г) $l_2 = 0,5 \text{ m}; j_{\text{MB2}} = 500 \text{ A/m}^2$ |         |       |         |        |       |       |
| 0,005                                                        | 119,674 | 0,294 | 44,162  | 9,375  | 0,035 | 0,073 |
| 0,01                                                         | 99,352  | 0,378 | 73,344  | 18,75  | 0,074 | 0,189 |
| 0,015                                                        | 83,495  | 0,373 | 71,27   | 28,125 | 0,071 | 0,28  |
| 0,02                                                         | 71,328  | 0,354 | 64,271  | 37,5   | 0,061 | 0,354 |
| 0,025                                                        | 61,766  | 0,334 | 57,124  | 46,875 | 0,051 | 0,417 |
| 0,03                                                         | 54,147  | 0,315 | 50,805  | 56,25  | 0,043 | 0,472 |
| 0,035                                                        | 47,766  | 0,297 | 45,206  | 65,625 | 0,036 | 0,52  |
| 0,04                                                         | 42,889  | 0,282 | 40,825  | 75     | 0,031 | 0,564 |
| 0,045                                                        | 38,73   | 0,269 | 37,011  | 84,375 | 0,027 | 0,605 |
| 0,05                                                         | 35,241  | 0,257 | 33,779  | 93,75  | 0,023 | 0,642 |

Використовуючи отримані результати з таблиці 2.4 побудуємо залежності  $P_1$ ,  $\Delta P$ ,  $\nu$ ,  $\eta_{\text{мгд}}$ ,  $Q = f(b)$ , які представлені на рисунках 2.25-2.29.

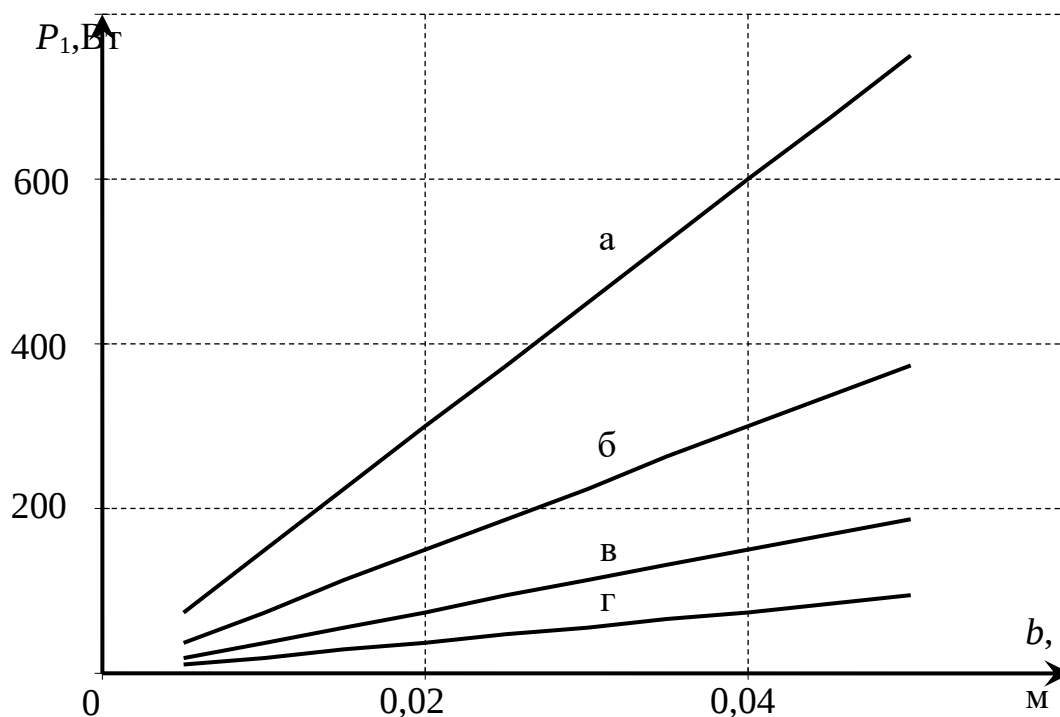


Рисунок 2.25 – Залежність  $P_1 = f(b)$

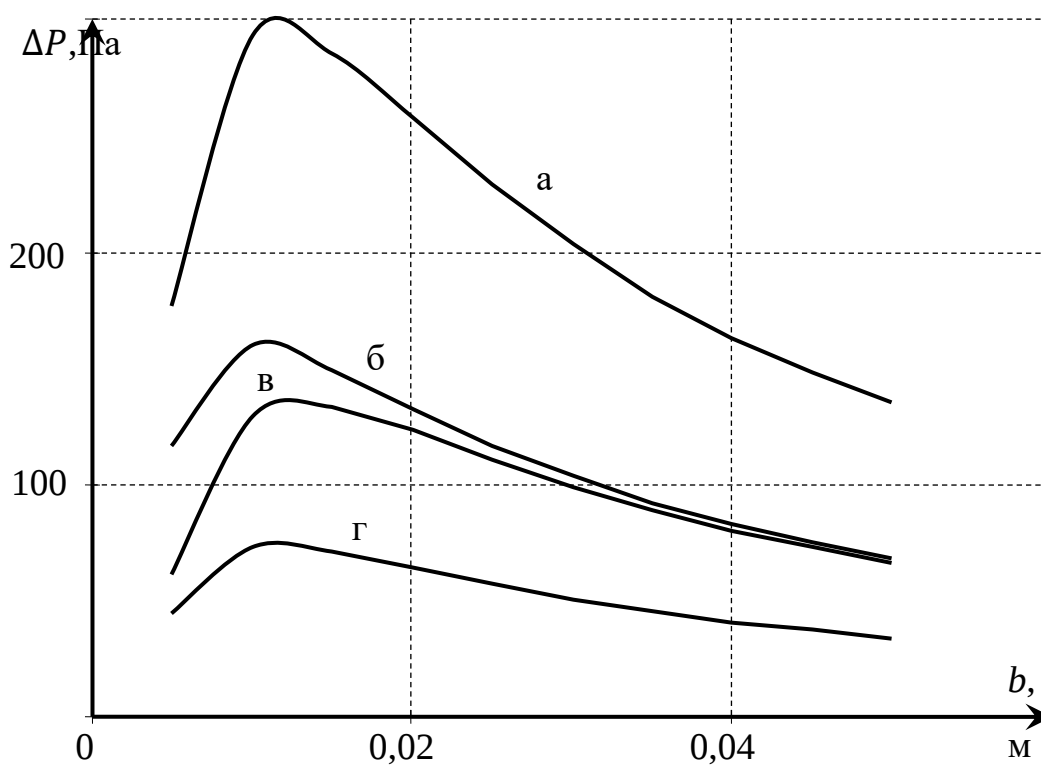
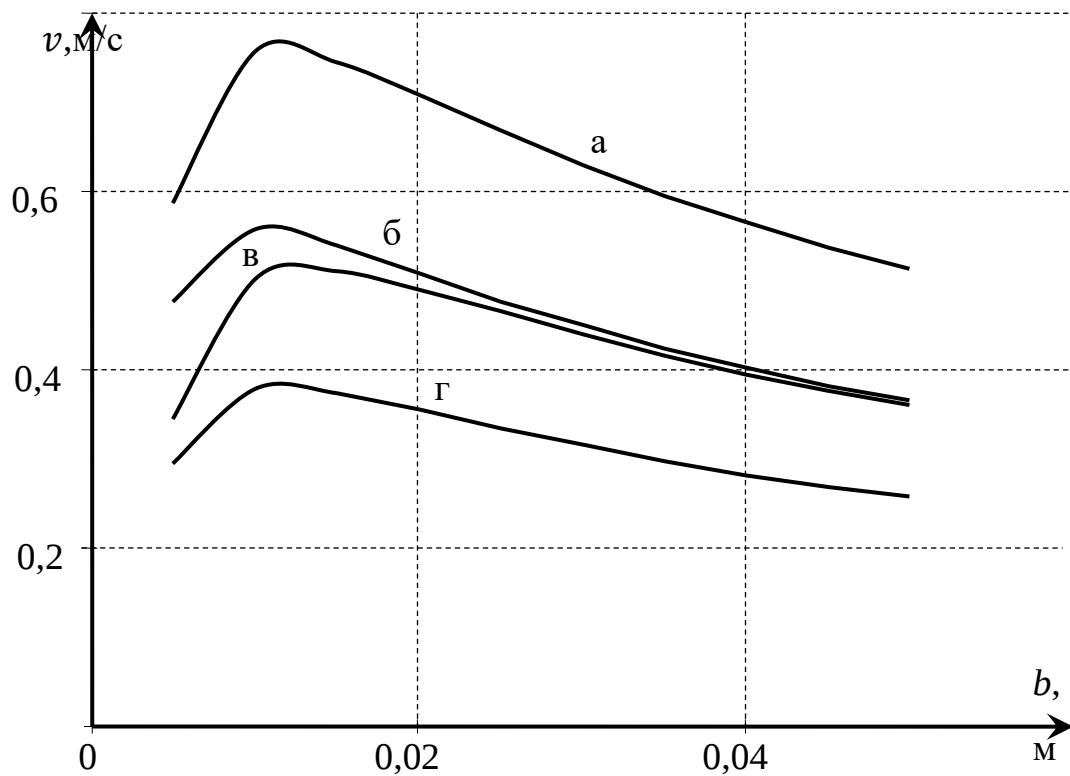
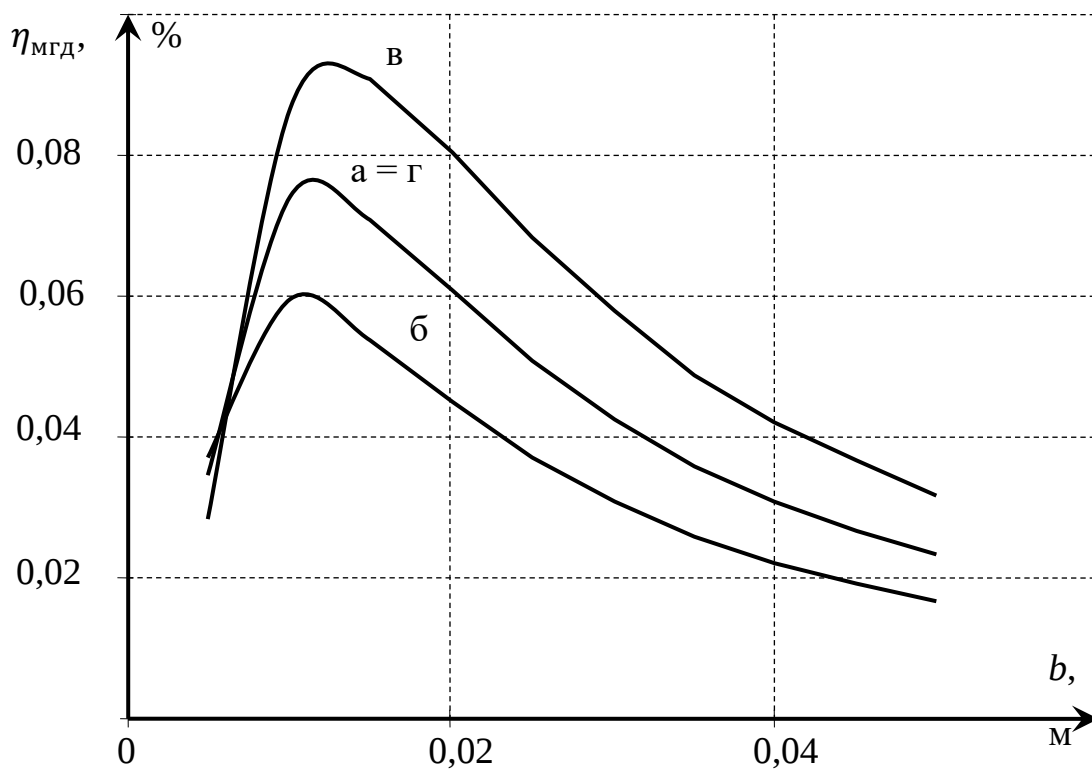
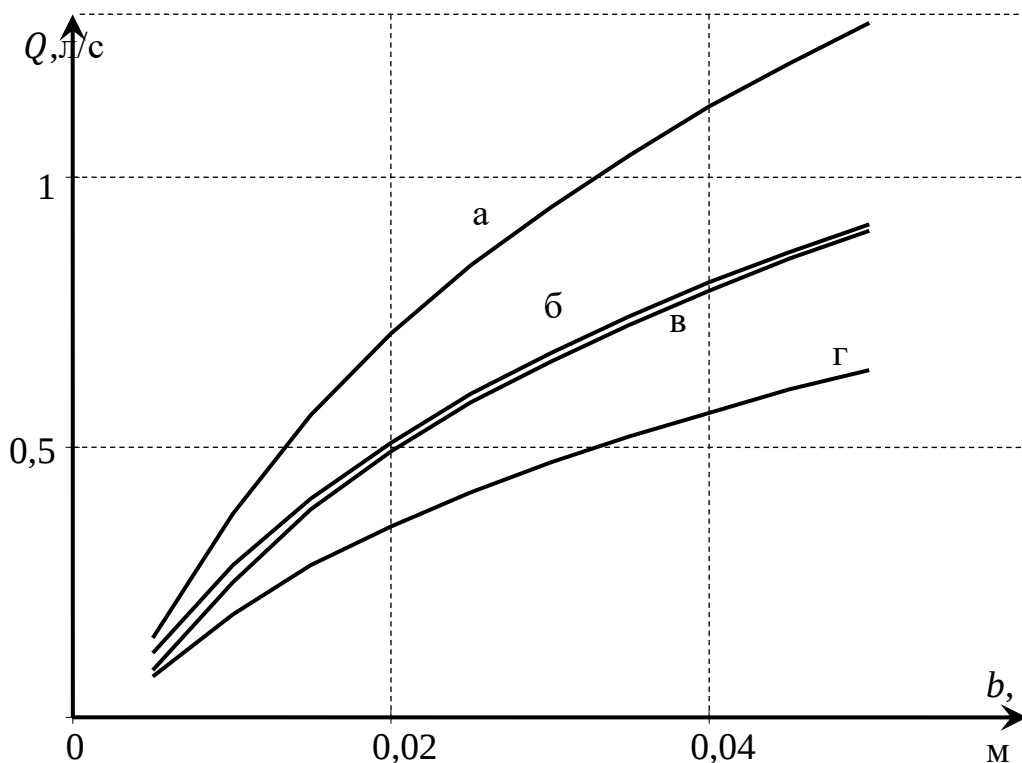


Рисунок 2.26 – Залежність  $\Delta P = f(b)$

Рисунок 2.27 – Залежність  $v = f(b)$ Рисунок 2.28 – Залежність  $\eta_{MGD} = f(b)$

Рисунок 2.29 – Залежність  $Q = f(b)$ 

З отриманих вище залежностей можна зробити висновок, що із збільшенням довжини МГД-каналу збільшується значення тиску, швидкості потоку та напору води. Найбільше ККД магнітна система набуває при  $l_1 = 1$  м;  $j_{\text{мв2}} = 500$  А/м<sup>2</sup>. Оптимальними відстанями між магнітами є  $b=0,01...0,025$ , так як саме на цьому проміжку графіки мають лінійний характер.

Якщо знехтувати втратами тиску під час течії в каналі, тоді отримуємо наступні формули для розрахунку МГД-каналу:

$$\Delta P = \Delta P_d;$$

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot j \cdot B \cdot l}{\rho}};$$

$$P_2 = \Delta P \cdot h \cdot b \cdot v = j \cdot B \cdot l \cdot h \cdot b \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot j \cdot B \cdot l}{\rho}};$$

$$\eta_{\text{мгд}} = \frac{B^{\frac{3}{2}} \cdot \sqrt{2 \cdot l}}{\rho_e \cdot \sqrt{j \cdot \rho}}$$

Тобто, чим більше довжина каналу, більша магнітна індукція і менша густина струму, тим більше ККД МГД-установки.

Витрата води в цьому випадку залежить прямопропорційно кореню квадратному від густини струму  $j$ , л/с:

$$Q = h \cdot b \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot j \cdot B \cdot l}{\rho}} \cdot 10^3.$$

Отже, збільшення густини струму одночасно призводить до зменшення ККД та збільшенню витрати води в МГД-каналі.

#### 2.4. Застосування магнітогідродинамічної установки

Дослідивши обрану магнітну систему, було встановлено, що найбільше ККД становить 0,09%. Тому використання такої установки в промислових масштабах не є доцільним. Найкращим варіантом використання таких установок є створення лабораторних стендів для дослідження магнітогідродинамічного ефекту в морській воді. Приклади таких стендів представлені на рисунках 2.30, 2.31.

На рисунку 2.30 представлений лабораторний стенд, за допомогою якого можна визначити перепад тиску в досліджуваному каналі. Морська вода з ємності 1 проходить через МГД-канал 2 та під тиском заповнює скляну трубку 3. Довжина МГД-каналу становить 0,05 м. Різниця висоти води в резервуарі та скляній трубці і буде шуканою величиною – перепадом тиску  $h \equiv \Delta P$ .

На рисунку 2.31 представлена інша модель лабораторного стенду для дослідження МГД-ефекту в морській воді. Морська вода з ємності 1 проходить через МГД-канал 2 та під тиском через трубку 3 заповнює резервуар для води 4. Цей стенд є фактично аналогом звичайного насосу, але через низький ККД його використанні не є доцільним. Проте в цій моделі є свої переваги: так як 99% енергії витрачається на тепло, тобто на нагрів морської води, то відбувається електроліз, виділяється  $NaCl$ , а отже, відбувається опріснення морської води.

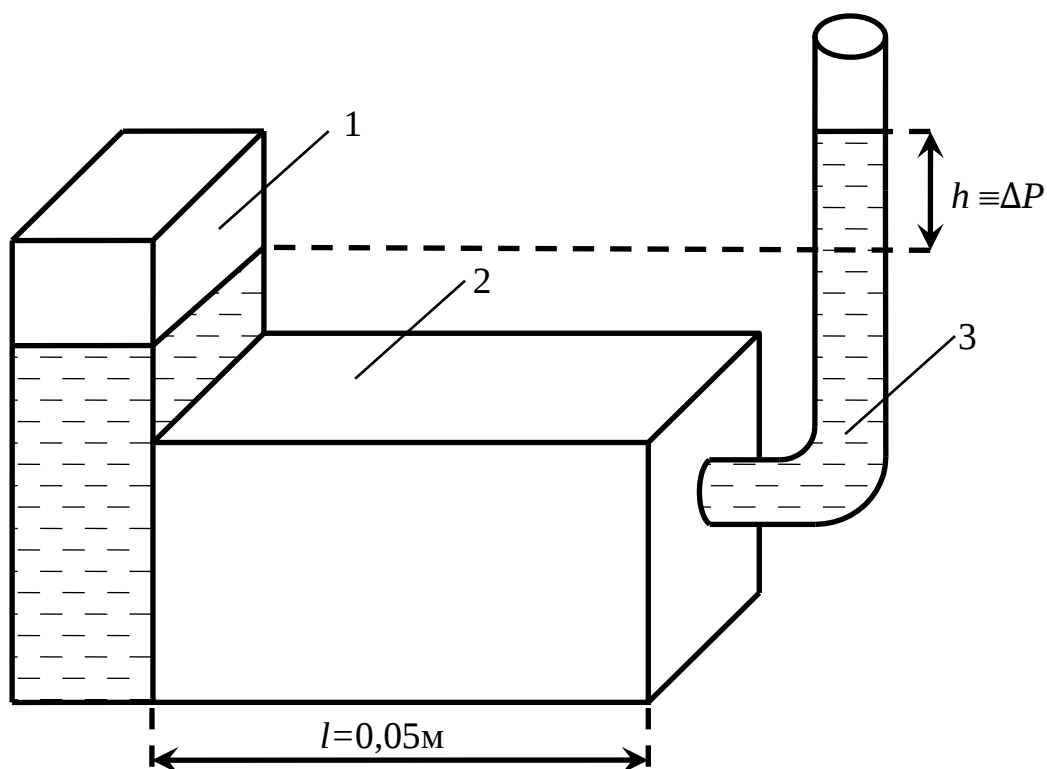


Рисунок 2.30 – Стенд №1 для дослідження МГД-ефекту в морській воді

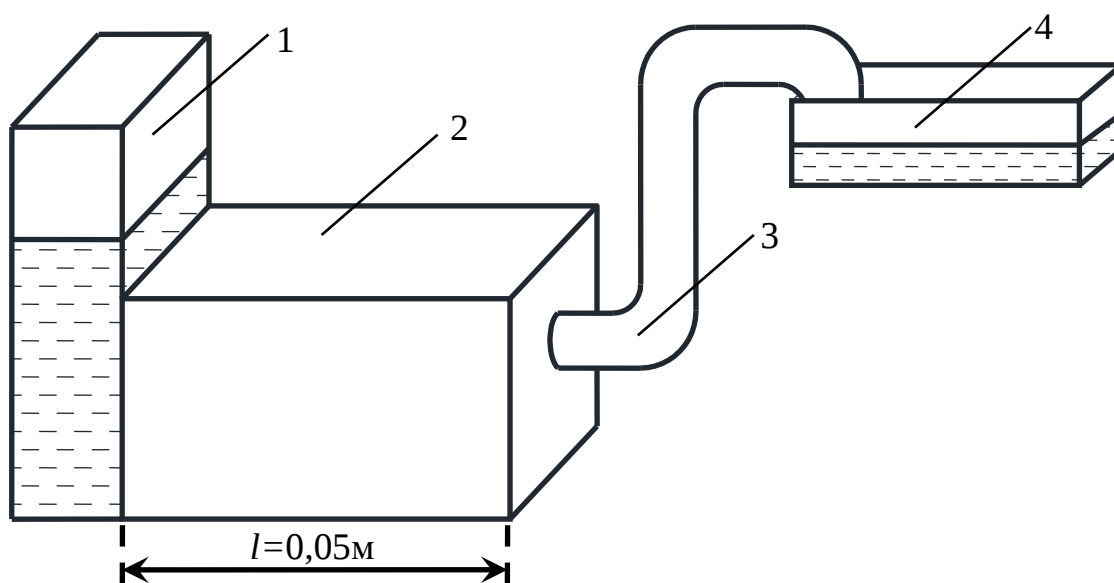


Рисунок 2.31 – Стенд №2 для дослідження МГД-ефекту в морській воді

Для досягнення відносно високого ККД (20-30%) замість постійних магнітів необхідно застосувати електромагнітні системи, що забезпечують магнітні індукції 10...20 Тл, енергоефективна реалізація яких можлива лише при використанні надпровідних систем, як було зазначено раніше.

## РОЗДІЛ 3. ВПЛИВ ЕЛЕКТРИЧНОГО СТРУМУ НА МОРСЬКУ ВОДУ

### 3.1. Електрохімічні процеси та їх організація

Електрохімія відноситься до області знань про взаємні перетворення хімічного і електричного видів енергії та про використання цих перетворень.

Електрохімічні процеси широко застосовуються в даний час в різних областях сучасної техніки, складаючи основу прикладної електрохімії: електрометалургії, гальванотехніки, електросинтез органічних і неорганічних сполук, виробництво хімічних джерел струму, хімотроніку, електрохімічні методи контролю та аналізу і тощо. Далеко не остання, за своїм практичним значенням, область прикладної електрохімії відноситься до розробки методів електрообробки забруднених водних систем, в якій вже зараз досягнуті значні успіхи, що дозволяють передбачити в майбутньому ширшу реалізацію електрохімічної технології для вирішення поставлених перед людством екологічних проблем.

Електрохімічне очищення забруднених природних і стічних вод заснована на використанні електричної енергії при проведенні процесів електролізу водних розчинів електролітів.

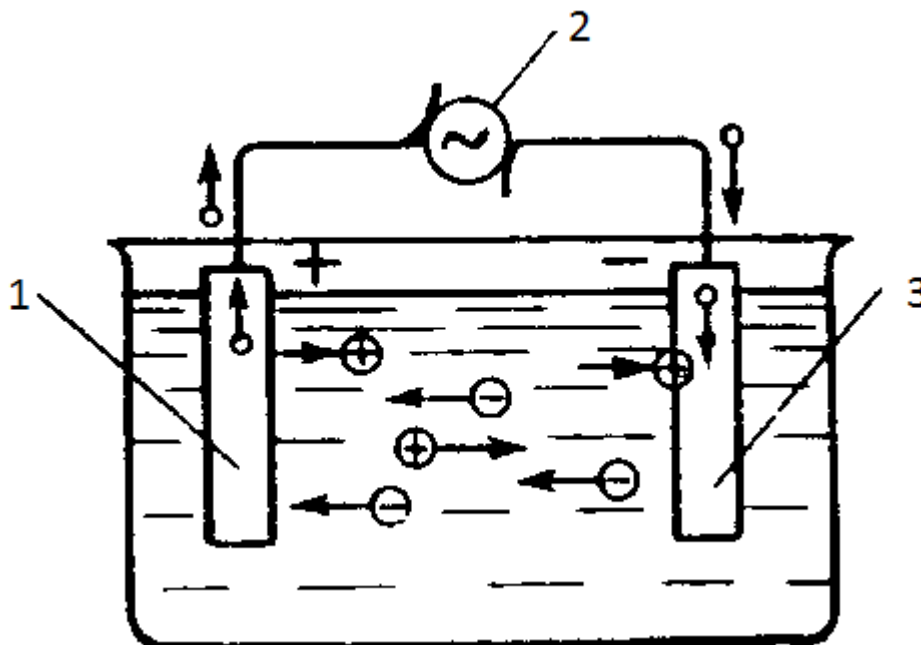
Електроліз здійснюється в системах, що складаються з наступних елементів:

- розчину електроліту – провідника другого роду, в якому речовини дисоційовані на іони (забруднені води є розчинами електролітів, так як в них завжди присутні іони в тій чи іншій концентрації);
- електродів – провідників першого роду, занурених у розчин електроліту;
- зовнішнього джерела струму;
- струпроводів – металевих провідників першого роду, що з'єднують електроди з джерелом струму.

Розглянемо коротко механізм проходження струму через розчини електролітів. За сучасними поглядами, електричний струм в металевих провідниках – це потік електронів, що рухаються від негативного полюса джерела струму до позитивного. Якщо з'єднати полюси джерела струму металевим

провідником, то джерело струму, подібно насосу, «засмоктує» електрони через позитивний полюс і виштовхує їх у провідник через негативний полюс.

Нехай, в розчин електроліту опущені два електроди, з'єднані з полюсами джерела струму і, отже, заряджені один позитивно (анод), другий негативно (катод)(рисунок 3.1).



1 – анод; 2 – джерело ЕРС; 3 – катод

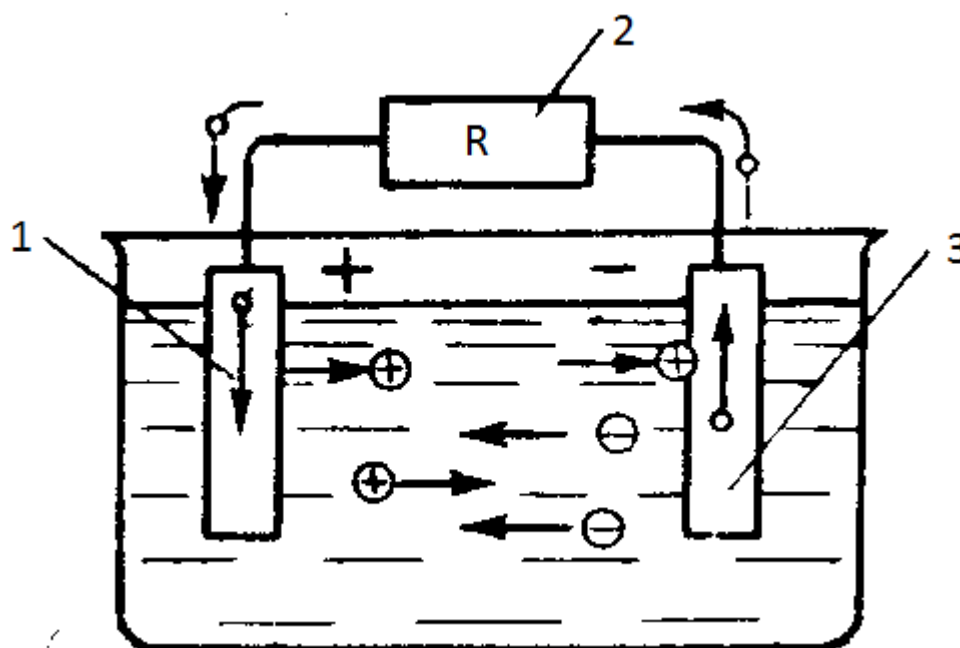
Рисунок 3.1 – Принципова схема електролітичної ванни

Вода сама по собі є поганим провідником, і електрони не можуть переміщатися в ній так, як в металевому провіднику, проте іони, що знаходяться в розчині, які утворюються при дисоціації електроліту, пересуваються по двох протилежних напрямках: позитивні іони (катіони) рухаються до катода, негативні (аніони) – до анода. Досягаючи катода, катіони отримують від нього відсутні їм електрони і стають нейтральними атомами або групою атомів (молекулами). Одночасно з цим аніони віддають аноду свої «зайві» електрони, теж переходячи в нейтральні атоми або групи атомів. Безперервний перехід електронів з катодів на катіони і з аніонів на аноди підтримує рух електронів в проводах, що з'єднують полюси джерела струму з електродами. При цьому число електронів, одержуваних анодом, дорівнює числу електронів, що передаються за той же час катодом, тобто

у зовнішньому колі струм йде так само, як він йшов би, якби електрони безпосередньо проходили через розчин. По суті ж, на кордоні розділу електрод – розчин відбувається перехід від електронної провідності до іонної, причому проходження електричного струму через провідники другого роду супроводжується виділенням на електродах продуктів електрохімічних реакцій – продуктів взаємодії іонів і електронів. Реакція між іоном і електроном на кордоні розділу електрод – розчин визначає перетворення електричної енергії в хімічну.

Електрохімічні процеси, як правило, здійснюються або за рахунок підведеної ззовні електричної енергії, або при її отриманні.

Хімічні перетворення в розчині електроліту за рахунок зовнішньої електричної енергії відбуваються в електролізерах або електролітичних ваннах. У таких системах частина розчину електроліту, що знаходиться біля анода, називається анолітом, біля катода – католітом.



1 – позитивний електрод; 2 – споживач струму; 3 – негативний електрод

Рисунок 3.2 – Принципова схема гальванічного елемента

Генерація електричної енергії за рахунок хімічних перетворень, що протікають в розчині електроліту відбувається в гальванічних елементах або хімічних джерел струму (рисунок 3.2). Тут електрод, що направляє електрони в

зовнішнє коло, називається негативним полюсом елемента, той, що приймає електрони із зовнішнього кола – позитивним.

У загальному випадку при електролізі протікають окислювально-відновлювальні процеси: на аноді – втрата електронів (окислення), на катоді – придбання електронів (відновлення). Однак механізм електрохімічних реакцій істотно відрізняється від звичайних хімічних перетворень речовин.

Відмінною особливістю електрохімічної реакції в порівнянні з хімічною є просторове розділення електрохімічної реакції на два пов'язаних процеса (дві поєднані електродні реакції).

Просторове розділення електрохімічних реакцій надає їм ряд специфічних якостей, яких немає у звичайних хімічних реакцій.

Так, умовою протікання звичайних гомогенних хімічних реакцій в розчині є взаємодія реагуючих компонентів (молекул, атомів, іонів) при їх зіткненні один з одним в будь-якій точці розчину. У момент зіткнення стає можливим перехід електронів з однієї речовини на іншу. Здійсниться цей перехід чи ні, залежить від запасу енергії реагуючих речовин і її співвідношення з енергією активації, яка є функцією природи хімічної реакції. Отже, необхідність контакту реагуючих частинок в розчині – перша характерна особливість гомогенного хімічного процесу. Друга особливість полягає в тому, що шлях електрона при цьому виявляється дуже малим, довжина його не перевищує радіуса атома або молекули.

При хімічних реакціях в розчинах місце зустрічі і напрямок електронних переходів орієнтовані в реакційному обсязі будь-яким чином або при будь-яких взаємних положеннях частинок, що реагують, – це є третьою характерною особливістю хімічного процесу, що відрізняється хаотичністю зіткнення між частинками і ненаправлення електронних переходів.

При електрохімічному процесі умови протікання хімічної реакції необхідно змінити так, щоб електронні переходи були б не безладні, а відбувалися в одному певному напрямку, тобто необхідно створити просторову спрямованість електронних переходів. Крім того, при цьому процесі, як уже було сказано, необхідно розчленовування електрохімічної реакції на два електродних акти, а

також істотне збільшення шляху електронних переходів до макроскопічних розмірів, так як використання енергії електричного струму можливо лише в тому випадку, якщо шлях електронів великий у порівнянні з розмірами атомів. Однак шлях електронного переходу не може бути більшим, якщо частки, що реагують, контактують один з одним. Тому необхідно ще й просторове розділення учасників реакції, що не допускає безпосередньо їх взаємодії.

Таким чином, при проведенні електролізу на відміну від протікання хімічних реакцій необхідний поділ реагентів і утворення гетерогенної системи, в якій перехід електронів від однієї групи атомів або молекул до іншої здійснюється через металеві провідники-електроди.

Проходження електричного струму через реакційний простір здійснюється як безпосередніми учасниками електрохімічної реакції (якщо вони присутні в іонізованому стані), так і спеціальними сполуками (електролітами), що володіють високою іонною провідністю.

В основі будь-якого електролізу лежать процеси розкладання речовин або отримання нових продуктів на межі електрод – розчин за допомогою електричного струму. При електролізі в залежності від фазово-дисперсного стану компонентів, що містяться в розчині, можуть також спостерігатися явища, пов'язані з електрокінетичними властивостями колоїдів. При цьому можуть протікати електрохімічні реакції відновлення і окислення, що супроводжуються утворенням твердих або газоподібних продуктів, процеси відновлення і окислення без виділення самостійної фази і процеси, що супроводжуються розчиненням матеріалу електродів.

В обсязі розчину, що піддається електролізу, за рахунок електродних процесів відбувається зміна активної реакції ( $pH$ ) середовища і окислювально-відновного потенціалу ( $Eh$ ) системи, а також фазово-дисперсні перетворення домішок води.

Практичне значення набуває область хімічних реакцій, що протікають в електричних розрядах, при яких змінюються гідродинамічні властивості дисперсної фази і забезпечується глибока мінералізація органічних сполук.

Всі явища і перетворення речовин при різних прийомах використання електролізу пов'язані загальною теорією процесів, що відбуваються на електродах і в обсязі електроліту. Між електролізом і явищами, що відбуваються в електричних розрядах, є настільки велика і принципова різниця, що крім зовнішнього уявлення про перетворення, пов'язаних з витратою електричної енергії, загального в області теорії, промислового здійснення і конструктивного оформлення апаратури у них немає. Проте всі відомі способи обробки рідких дисперсних середовищ з використанням електричного струму слід відносити до електрохімічних методів, так як поряд з численними процесами зміни електрокінетичних властивостей речовин в розчинах електролітів обов'язково протікають і хімічні процеси.

### **3.2. Хімічний склад морської води**

Морська вода – це вода морів і океанів. Через велику кількість сольових домішок і різних мінералів, вона практично непридатна до використання в побутових і промислових цілях.

Морська вода – багатоелементна речовина. Починаючи з XIX століття, вчені з великою увагою ставляться до її вивчення.

Вода як розчинник має властивість розчиняти різні речовини. Розчинна здатність води визначається її діелектричної проникністю. При кімнатній температурі діелектрична проникність води дорівнює 81.

Це означає, що два протилежних електричних заряди взаємно притягуються в воді, з силою, рівною  $1/81$  сили їх взаємодії в повітрі. Таким чином, відділення іонів від кристала будь-якої солі у воді в 81 разів легше, ніж в повітрі.

Якщо воді дати достатньо часу, вона може розчинити практично будь-яку тверду речовину. Через унікальну розчинюючу здатність води до цих пір не вдалося отримати хімічно чисту воду – вона завжди містить розчинений матеріал судини. Тому в природі не зустрічається хімічно чиста вода.

Морська вода відрізняється від вод суші багатшим якісним складом розчинених в ній речовин, і тому всі її властивості виявляються відмінними від властивостей прісної води.

Особливістю морської води як розчину є те, що вона представляє слабкий і тому повністю іонізований розчин, що містить велику кількість частинок. Розміри розчинених в морській воді частинок дуже різноманітні.

Тому морська вода може в окремих випадках поводитися як молекулярний або кристалоїдний розчин, коли розміри розчинених частинок менше  $10^{-7}$  см. При збільшенні розмірів розчинених неорганічних і органічних речовин вона наближається до колоїдних, а поблизу узбережжя до каламутних розчинів. У таких розчинах відбувається поступове з'єднання розчинених речовин і осадження внаслідок збільшення їх ваги. За масою в воді міститься 11,19% водню і 88,81% кисню. Однак в морській воді розчинені майже всі хімічні елементи таблиці Менделєєва.

Концентрація деяких з них настільки мала, що їх присутність виявляється тільки в морських організмах, які акумулюють ці елементи з морської води.

Крім них в морській воді розчинені деякі гази: кисень, азот, аргон, вуглекислота, сірководень і деяка кількість органічної речовини океанічного і материкового походження.

Середня кількість розчинених у водах Світового океану твердих речовин становить близько 3,5% за вагою і лише в окремих морях і затоках, з'єднаних з океаном, може досягати 4,1% (Червоне море, Перська затока).

Весь хімічний склад морської води можна поділити на 5 груп:

- головні іони (11 іонів – хлор, натрій, сульфат, магній, кальцій, калій, бікарбонат, бром, барит, стронцій, фтор), які складають 99,98% маси всіх розчинених речовин;

- розчинені гази ( $O_2$ ,  $N_2$ ,  $CO_2$ ,  $H_2S$ ,  $Ar$  та інші інертні гази), при цьому співвідношення у воді  $O_2 : N_2 = 1 : 2$  (що було встановлено ще А.Лавуазьє в 1783 р.), а не  $1 : 4$ , як в повітрі;

- біогенні елементи ( $C$ ,  $H$ ,  $N$ ,  $P$ ,  $Si$ ,  $Fe$ ,  $Mn$ ) та їх сполуки, з яких складаються морські організми;

- група мікроелементів;

- органічні речовини.

Найбільше в морській воді міститься хлору – 1,94%, потім за процентним відношенням йдуть: натрій – 1,08%, магній – 0,13%, кальцій – 0,04%, калій – 0,04%.

Морська вода характеризується наступним співвідношенням іонів:



Найголовніші розчинені у воді елементи зазвичай знаходяться не в чистому вигляді, а у вигляді сполук (солей). Основними з них є:

- хлориди ( $NaCl$ ,  $MgCl_2$ ,  $KCl$ ), вони обумовлюють гірко-солоний смак води;
- сульфати ( $MgSO_4$ ,  $CaSO_4$ ,  $K_2SO_4$ );
- карбонати ( $CaCO_3$ ).

Таким чином, в морській воді різко переважають хлориди і, в першу чергу,  $NaCl$  (близько 78%),  $MgCl_2$  (> 9%),  $KCl$  (близько 2%), потім сульфати –  $MgSO_4$  (понад 6,5%),  $CaSO_4$  (близько 3,5 %), а гідрокарбонати становлять менше 1%.

У річковій воді співвідношення між розчиненими солями зворотне. Найбільше в ній міститься карбонатів (60,1%) і найменше хлоридів (5,2%). Загальний вміст твердих речовин, розчинених в морській воді, висловлюють в тисячних частках вагових одиниць - проміле і позначають знаком ‰. Зміст розчинених твердих речовин, виражених в проміле, чисельно дорівнює їх вазі в грамах в одному кілограмі морської води.

У Світовому океані безперервно йдуть складні хімічні, біологічні та геологічні процеси, що змінюють склад і зміст розчинених в ньому речовин. Ці процеси можна розділити на дві групи.

Процеси 1-ї групи (приплив прісних вод, опади, випаровування, танення льоду) змінюють загальну концентрацію розчину, але не змінюють співвідношень між розчиненими речовинами. При цих процесах концентрація розчину може змінюватися від 0 до 4‰ (від 0 до 40 ‰).

Процеси 2-ї групи (фотосинтез рослин і дихання тварин, сильно змінюють зміст газів, діяльність бактерій і діяльність морських організмів, які витрачають хімічні речовини на будівлю своїх кістяків і панцирів, а також розчинення донних відкладень) змінюють співвідношення між розчиненими у воді речовинами. Ці процеси можуть сильно – в кілька разів – змінювати вміст фосфатів, нітратів,

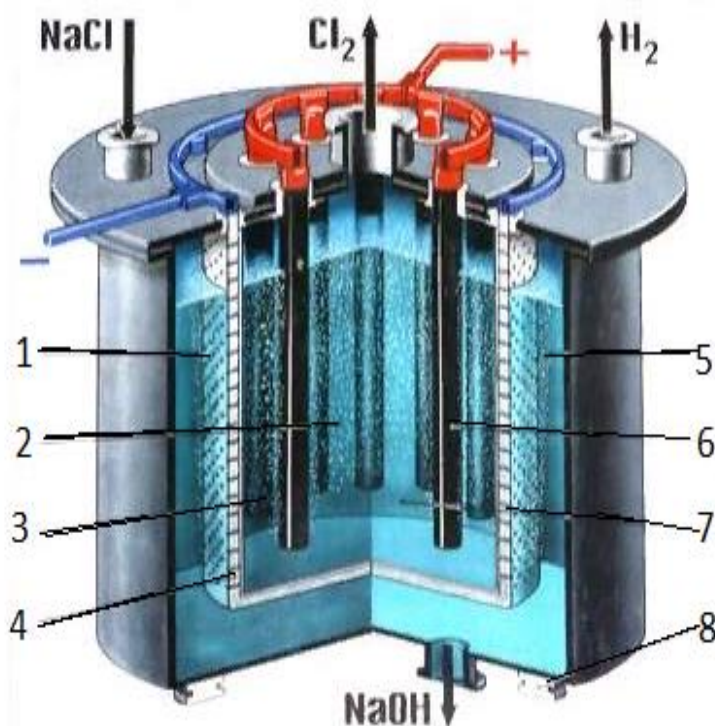
нітритів та інших мікроелементів, що мають велике біологічне значення, так як вони в значній мірі визначають умови життя в океані. Вміст основних елементів ці процеси майже не зачіпають.

Присутність в морській воді таких елементів, як *Na*, *K*, *Mg*, *Ca*, обумовлено вивітрюванням гірських порід і подальшим їх винесенням річками. Вміст *Cl*, *SO<sub>4</sub>*, *Br* обумовлений дегазацією мантиї і виносом їх в океан через атмосферу або по дну океану. Можна припустити, що сольовий склад океану змінювався в результаті виносу береговим стоком продуктів хімічного вивітрювання земної кори і надходження летючих речовин (насамперед *HCl*), що виділяються мантиєю.

### 3.3. Електроліз морської води

Основними процесами на електродах при електролізі водних розчинів є: на катоді – виділення водню, розряд металевих іонів з електрохімічним виділенням (осадженням) металів або відновлення речовин без виділення самостійної фази, на аноді – виділення кисню, галогенів, окислення речовин без виділення самостійної фази або електролітичне розчинення металу електрода.

Бульбашки водню, що виділяються на катоді здатні транспортувати нерозчинні домішки з об'єму рідини на її поверхню: піднімаючись в потоці рідини, вони стикаються з нерозчинними частинками, прилипають до них і флотують їх на поверхню (рисунок 3.3).



- 1 – бульбашки водню; 2 – бульбашки хлору; 3 – азбестова діафрагма;  
 4 – перфорований залізний катод; 5 – катодний простір;  
 6 – графітові аноди; 7 – анодний простір; 8 – ізолятори

Рисунок 3.3 – Електрохімічне отримання хлору, водню з морської води

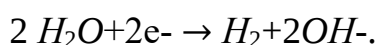
До катодних процесів розряду металевих іонів, що супроводжується виділенням (осадженням) твердої фази, відносяться так звані процеси електрокристалізації металів, що мають місце при очищенні стічних вод від іонів цинку, нікелю, міді, кадмію та інших. Кристалізація металів істотно відрізняється від звичайного виникнення і зростання кристалів в рідині, що пояснюється перш за все впливом сил зовнішнього електричного поля. Спеціальним підбором матеріалу і форми електродів, умов і режиму електролізу можна істотно впливати на структуру катодних опадів.

Все різноманіття анодних реакцій можна розділити на два процеси, що відбуваються на нерозчинних і розчинних анодах.

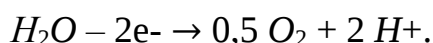
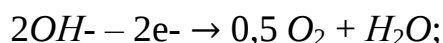
Типовими процесами на анодах з матеріалів, що не піддаються електрохімічному розчиненню, в залежності від сольового складу розчину і умов електролізу є процеси виділення кисню і хлору. Можливо також утворення

перекису водню, озону та інших з'єднань. Отримувані при цьому анодні продукти є сильними окислювачами, що володіють особливо великим запасом хімічної енергії в момент їх утворення, тому вони широко використовуються для знезараження і очищення природних і стічних вод від органічних забруднень.

У процесі електролізу морської води на аноді відбувається розряд іонів  $Cl^-$  з утворенням хлору, а на катоді в результаті відновлення води утворюються гідроксид-іони і водень. Процеси, що протікають при цьому, описуються наступними рівняннями:



Одночасно з цими процесами на аноді можуть протікати процеси розряду гідроксильних іонів або води:



Співвідношення між швидкостями виділення на аноді хлору і кисню визначається цілою низкою чинників. Для забезпечення протікання анодного процесу з утворенням хлору необхідно використовувати відповідний матеріал анода і підтримувати певні умови електролізу –  $pH$  розчину електроліту, вміст хлориду натрію в розчині електроліту, щільність струму, температуру процесу.

Електроліз розчинів кухонної солі або природних хлоридних розчинів – підземних мінералізованих вод і морської води – використовується для отримання гіпохлориту натрію як високоефективного дезінфектанта.

Гіпохлорит натрію  $NaClO$  – сіль хлорноваристої кислоти, утворює зеленувато-жовті кристали, які при нагріванні до температури вище  $40^\circ C$  розкладаються з утворенням хлориду натрію і кисню.

Електрохімічний метод отримання гіпохлориту натрію найефективніше застосовувати при отриманні порівняно розбавлених розчинів, в разі установок невеликої потужності з використанням місцевої вихідної сировини, наприклад морської води, природних розсолів.

### **3.3.1. Оновлена технологія електролізу морської води**

Існуючі методи розщеплення вимагають використання очищеної рідини, оскільки в солоній морській воді іони хлору швидко роз'їдають металевий анод, різко зменшуючи термін його служби. Вчені з Стенфордського університету знайшли спосіб вирішення цієї проблеми.

Вони виявили, що, якщо покрити анод шарами, що мають негативні заряди, то вони будуть відштовхувати іони хлору і сповільнювати корозію основного металу. Дослідники нанесли гідроксид нікелю-заліза поверх сульфідів нікелю, що покриває ядро з нікелевої піни. Нікелева піна виконує функцію провідника, а гідроксид нікелю і заліза викликає розщеплення води. У процесі електролізу сульфід нікелю стає в негативно зарядженим шаром, що захищає анод.

За словами команди, без захисного покриття в таких умовах пристрій пропрацює близько 12 годин, а після цього від нього нічого не залишиться. Однак додатковий шар збільшує термін служби системи більш ніж на 1000 годин.

При цьому зникає необхідність ослаблення електричного струму для уповільнення корозії. В ході випробувань вчені проводили через свій багат шаровий пристрій в 10 разів більше електроенергії, ніж в стандартних установках, що прискорило розщеплення і значно підвищило ефективність системи.

Дослідники стверджують, що технологію можна застосовувати не тільки для отримання водневого палива, але і для створення мобільних пристроїв з виробництва кисню. Наприклад, щоб водолазам або підводним човнам не було потрібно підніматися на поверхню для поповнення запасів повітря.

### **3.3.2. «Ударний» електроліз**

Проводячи ряд дослідів над морською водою, вчені виявили, що електрострум певних параметрів витягує іони солей, розчинених у рідині. Це відкриває нову еру в технології опріснення води, так як тепер установкам не потрібні дорогі фільтри і мембрани. Крім того, морську воду не потрібно

попередньо нагрівати до температури кипіння, що також економить витрати на електроенергію.

Технологію назвали «ударним» електролізом. Група вчених на чолі з Мартіном Безентом розробила електричну установку на основі даного методу.

Для опріснення води за допомогою електроструму застосовується пориста речовина – фріт, яка складається зі скляних частинок невеликого розміру. У крайніх точках цього фільтра розташовані електроди, на які подається струм певних параметрів. Коли в область між електродами надходить солонна вода, то в середовищі фріта утворюються ударні хвилі, що розділяють рідину на два різних потоки. Іони натрію (сіль) витісняються в окремий потік. Відповідно чиста вода виявляється в іншому потоці.

Дана технологія може використовуватися і для знезараження води, так як електрострум розщеплює хвороботворні організми і виводить їх з рідини. Тому вода не тільки опріснюється, але і дезінфікується.

«Ударний» електроліз буде взято на озброєння силами МНС різних країн, які виїжджають на місце катастроф і стихійних лих. Цей метод дозволить без істотних витрат і швидко забезпечити постраждалих питною водою.

### **3.4. Електродіаліз морської води**

Електродіаліз – процес видалення з розчинів (провідників другого роду) іонів розчинених речовин шляхом перенесення їх через мембрани в поле постійного електричного струму. Відомо, що при накладенні постійного електричного поля на розчин в останньому виникає рух катіонів (включаючи іон водню) до негативно зарядженого катода, а аніонів - до анода.

Ця мембранна система використовується з кінця 1950-х років. В основі лежить принцип фільтрації розчинених у воді солей через кілька селективних мембран.

Морська вода накачується між двома мембранами, які відокремлюють її від електродів (рисунок 3.4). При проходженні струму катіони переміщуються у напрямку до катода, а аніони - у напрямку до анода (рисунок 3.5). Концентрація

іонів поблизу електродів, за межами напівпроникних мембран, знижується за рахунок прокачування морської води, а вода в просторі між мембранами поступово опріснюється. Для роботи установки з опріснення морської води методом електродіалізу використовується напруга  $\sim 500$  В і слабкі струми порядку міліампера.

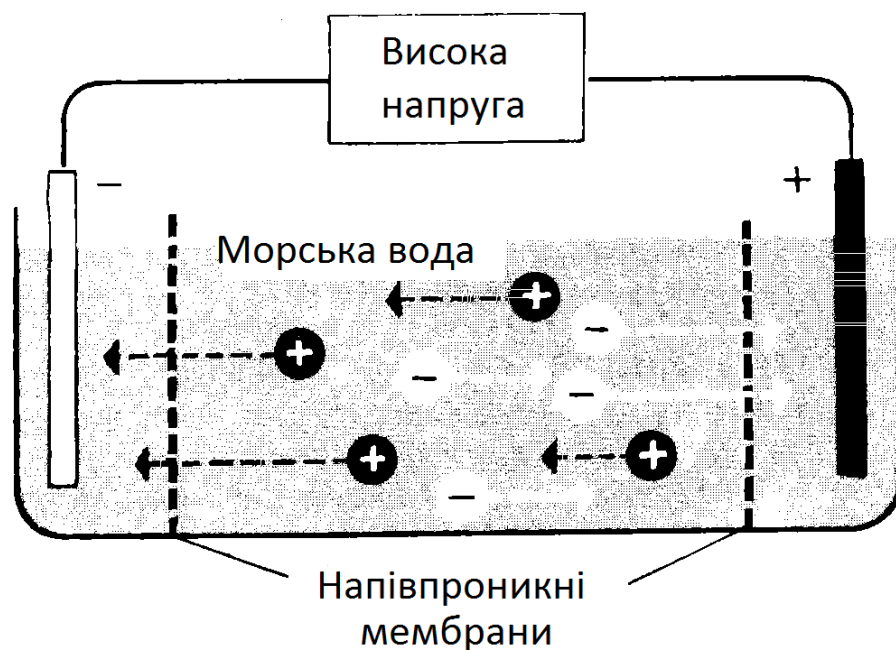


Рисунок 3.4 – Найпростіша схема електродіалізу

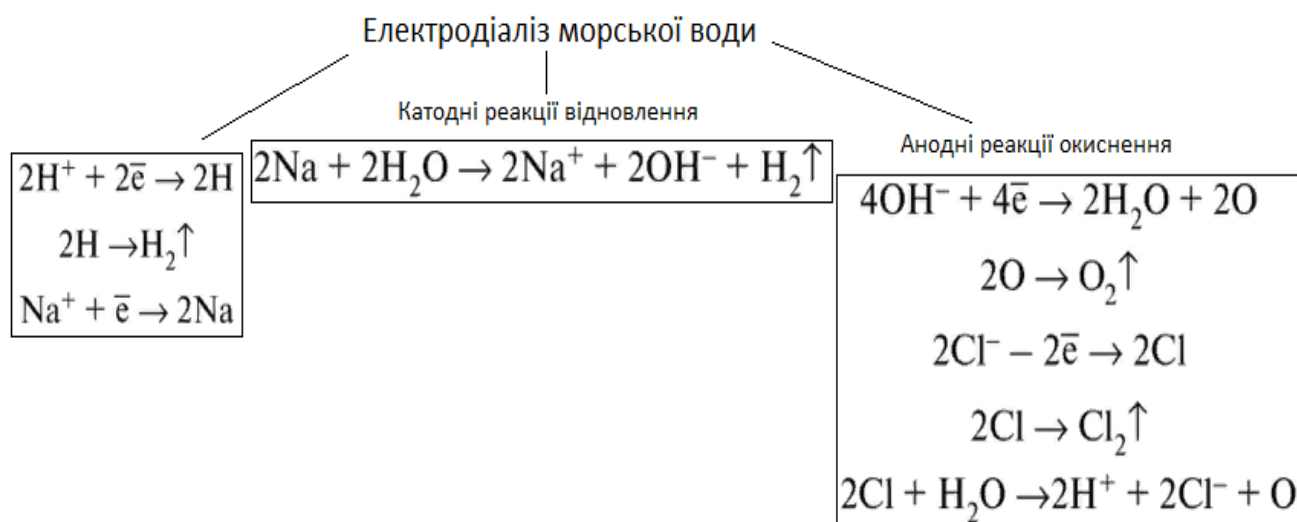


Рисунок 3.5 – Хімічні реакції електродіалізу морської води

Відділення солей здійснюється за рахунок дії електричного поля, як показано на рисунку 3.6. В результаті цього процесу в одній камері збирається збагачений розсолу розчин, а в іншій камері вода опріснюється і вміст розчинених в ній солей значно падає.

Принцип роботи такого опріснювача морської води заснований на використанні міцних, довговічних мембран, стійких до хімічних і термічних дій. Завдяки цьому, електродіаліз можна проводити при підвищених температурах, що підвищує якість очищення.

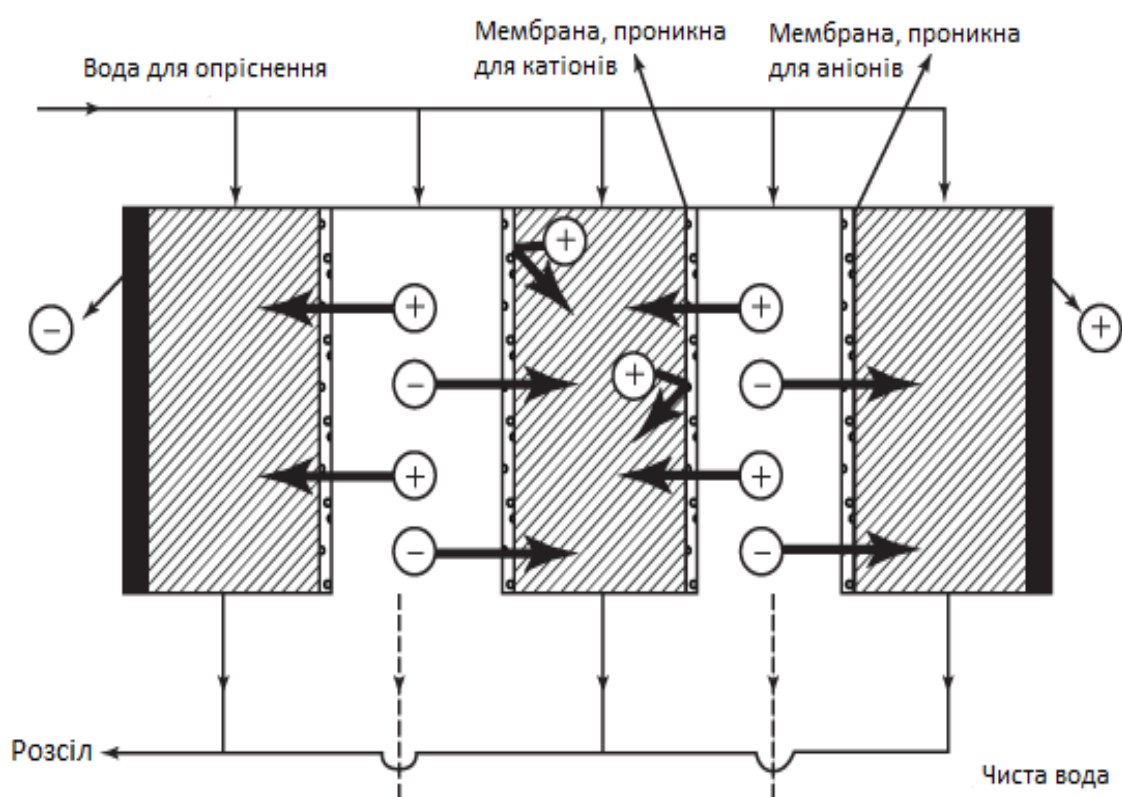


Рисунок 3.6 – Електродіалізна система

У процесах даного типу зазвичай застосовуються два типи мембран:

- гомогенні мембрани, одержувані в результаті хімічного (або радіохімічного) процесу в рамках функціональної системи на інертному носії (наприклад, тефлон, поліетилен);

- гетерогенні мембрани, одержувані з іонообмінних смол в поєднанні з сумісним матеріалом (ПВХ, поліетилен), нанесених на основу з поліестеру, поліаміду тощо.

Загальна опріснювальна продуктивність описаних вище процесів становить від 1000 до 15000 м<sup>3</sup> / день, проте відомі і більш потужні установки.

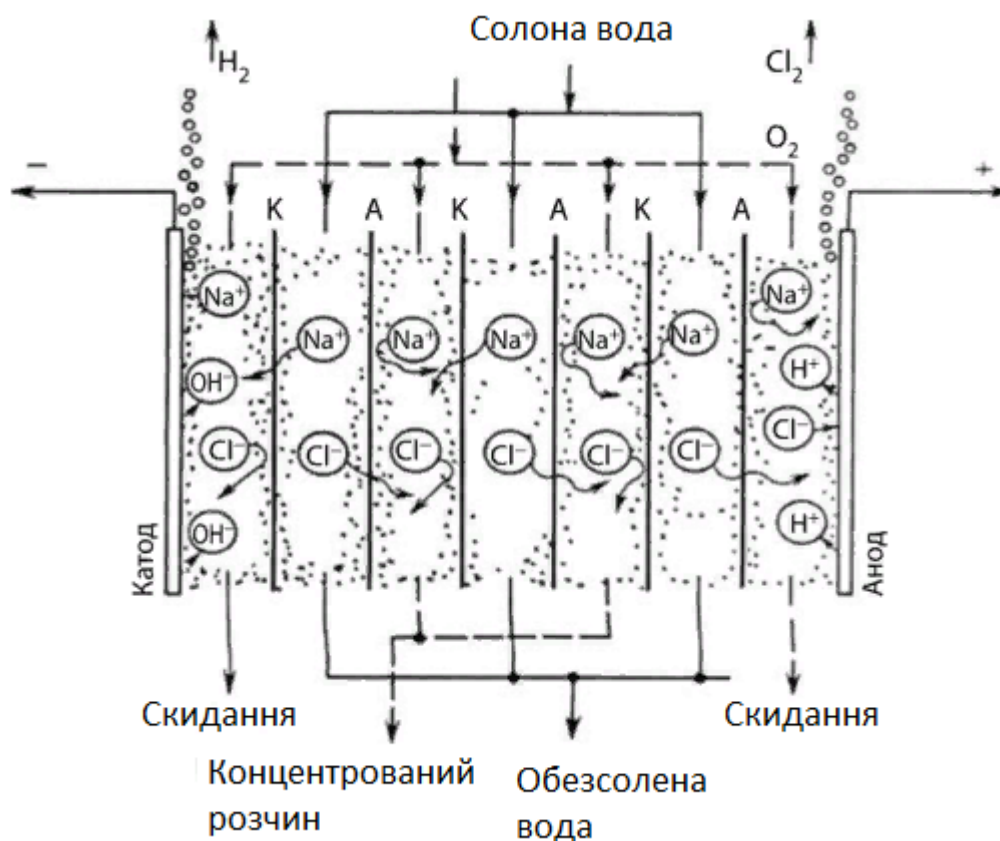
Електродіалізна система вимагає обов'язкового попереднього фільтрування вихідної води для видалення з неї зважених часток, органічних речовин, а також мінеральних речовин, шкідливих для робочих мембран (залізо, марганець, кремній).

Розглянемо принцип дії багатокамерного електродіалізатора.

Оброблювану морську воду поділяють катіонітовими і аніонітовими мембранами, що чергуються, які утворюють також розсольні і знесольовальні камери. Дві різні камери утворюють комірку. Через таку систему пропускається електричний струм. Катіони, рухаючись до катода (рисунок 3.7), вільно проникають через катіонітові мембрани К, але затримуються аніонітовими мембранами Л, а аніони, рухаючись в напрямку анода, проходять через аніонітові мембрани, але затримуються катіонітовими, в результаті чого з одних камер (наприклад, з парних) іони обох знаків виводяться електричним струмом постійного напрямку в суміжні камери.

Тому вода в парних камерах опріснюється, а в непарних концентрація іонів еквівалентно підвищується. Знесолена вода і розсіл збираються і окремо видаляються з апарату.

Велике число комірок в одному електродіалізаторі при наявності одного анода і катода зводить до мінімуму втрати на розряд іонів на електродах. Таке інженерне рішення дозволяє значно зменшити витрату енергії на відділення солей від води.



К – катіонна мембрана, яка пропускає тільки катіони;

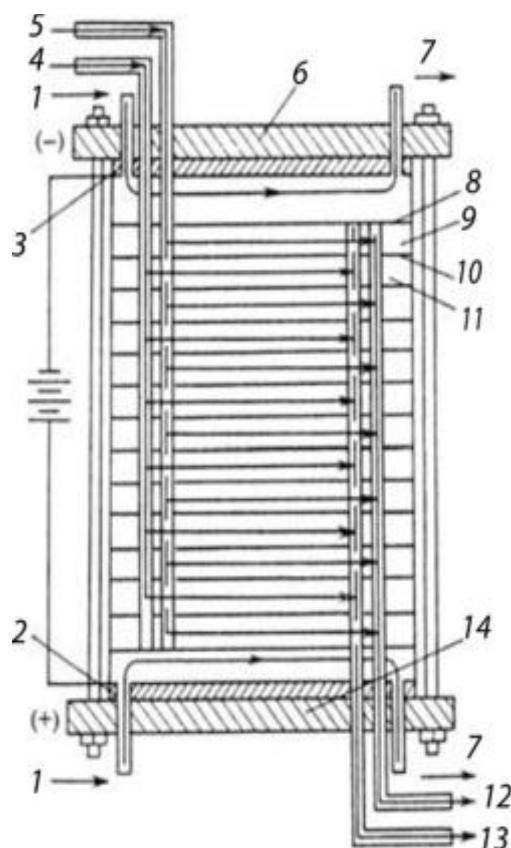
А – аніонна мембрана, яка пропускає тільки аніони

Рисунок 3.7 – Схема багатокамерного електродіалізатора

Такий апарат, в якому проводиться відділення солей від води, називається багатокамерним електродіалізатором (рисунок 3.8). Він має по одному катоду і аноду (виготовлених зі спеціального графіту або платинованого титану) і до 300 комірок, утворених стінками катіонітових і аніонітових мембран.

Серйозними перешкодами для глибокого знесолення води в процесі електродіалізу є: підвищення електричного опору в камерах з ростом ступеня знесолення; перенесення води через мембрани в процесі осмосу; розкладання води при високій щільності струму; можливість утворення опадів на мембранах в камерах концентрування.

Експериментально показано, що при концентрації солей в камерах знесолення нижче 200-300 мг / л різко зростає витрата електроенергії, що обмежує глибину знесолення води зазначеними межами.



- 1 – вода на промивку електродної камери; 2 – анод; 3 – катод;  
 4 – вода на промивку розсольних камер;  
 5 – подача оброблювальної води знесольовальні камери;  
 6 – верхня прижимна плита; 7 – вихід з електродної камери;  
 8 – катіонітна мембрана; 9 – прокладка в камері знесольовання;  
 10 – аніонітна мембрана; 11 – прокладка в розсольній камері;  
 12 – вихід обробленої води; 13 – вихід розсолу;  
 14 – нижня плита

Рисунок 3.8 – Розріз багатокамерного електродіалізного апарату

Обмеження щільності струму при електродіалізі пов'язано з явищем концентраційної поляризації, що виникає на іонітових мембранах. Суть цього явища полягає в тому, що рух іонів через мембрану під дією електричного струму йде швидше, ніж в розчині, що призводить до падіння концентрації близько приймаючої сторони мембрани і до підвищення її біля сторони мембрани, що віддає. Існує така щільність струму, так звана, гранична, при якій концентрація іона, що переноситься, біля приймаючої сторони мембрани знижується до нуля і

починається перенесення іонів  $H^+$  і  $OH^-$ , що утворилися під час електролізу води. Цей процес викликає перевитрату електроенергії, не знижуючи солевмісту води, і призводить до зміни  $pH$  середовища, що може викликати утворення опадів на мембранах.

З урахуванням зазначених обмежень оптимальний рівень зниження солевмісту оброблюваної води в одноступінчатих електротродіалізних апаратах не перевищує 40-50%.

Для запобігання утворенню опадів крім обмеження робочої щільності струму роблять підкислення води, переполюсовку напруги, змінний пропуск води через розсолні та знесолювальні камери.

Електродіалізні опріснювальні установки поділяються на циркуляційні і прямоточні (можуть бути з прямотоком і протитечією розсолу).

Технологічні схеми електродіалізних опріснювальних установок складаються з наступних вузлів: попередньої підготовки вихідної води; власне електродіалізні установки з комплектуючим обладнанням; насосів опріснення води зі збірним резервуаром; фільтрів поліпшення якості води з активованим вугіллям; установок УФ-опромінення для знезараження води; кислотного господарства; господарства стисненого повітря.

### 3.5. Електроосмотичне опріснення води

Електротехнологічні установки, що використовують явище електроосмосу, застосовують для очищення води, виділення розчинених в ній речовин, отримання питної води для населення і прісної води для виробництва.

Установка електроосмотичного опріснення води призначена для отримання прісної води шляхом очищення морської води (рисунок 3.9). Установка складається з 10-12 комірок, кожна з яких розділена діафрагмами 3 на три відділення 6, 7, 8. Інформація, що надходить для очистки води по трубах 5 подається в нижню частину всіх трьох відділень комірок. У воду поміщають електроди 2, на які подають високу напругу постійного струму. Розчинені у воді солі ( $Na_2SO_4$ ,  $CaSO_4$ ,  $CaHCO_3$ ) дисоціюють на катіони  $Na^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $H^+$ , що рухаються до катода 8, і аніони

$SO^{HCO}_2^-$ , що прямують до анода 6. У катодному відділенні 8 вода стає лужною, а в анодному - кислою, і по трубах 1 вона відводиться по черзі через всі 10-12 комірок опріснювального пристрою. У міру збідніння води, що очищається солями опір розчину поступово, від комірки до комірки, зростає. З цієї причини до електродів комірок від джерела постійного струму підводиться напруга, що збільшується від 55 до 220 В від комірки до комірки в міру зростання опору розчину.

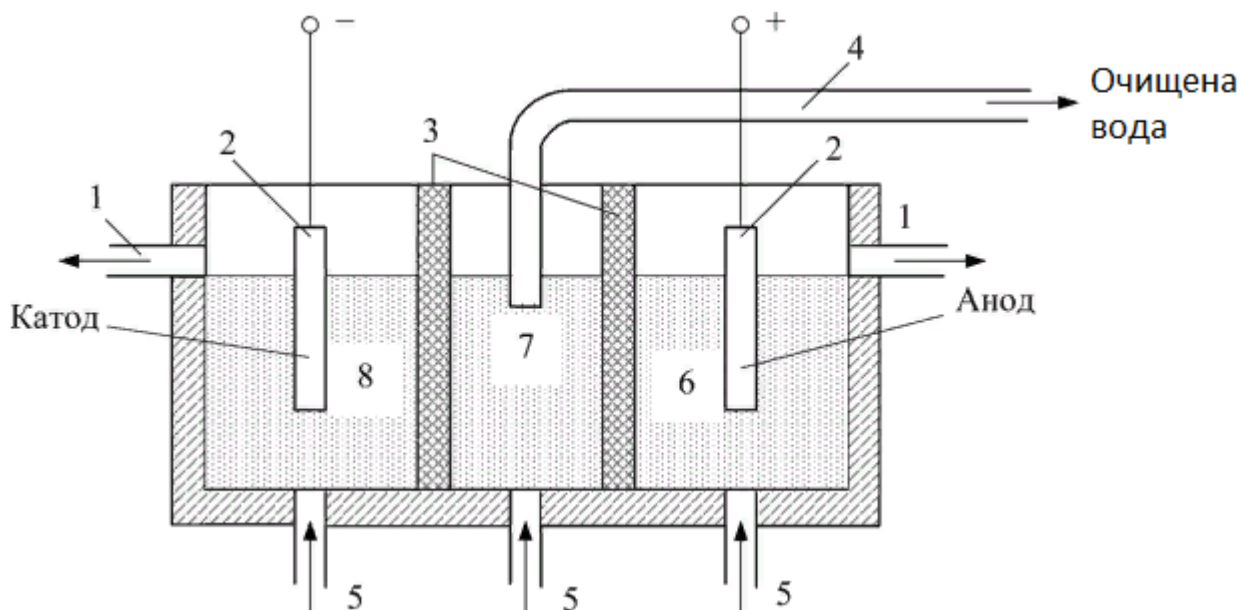


Рисунок 3.9 – Схема установки електроосмотичного опріснення води

## ВИСНОВКИ

1. Розглянуто МГД-перетворювачі та встановлено, що для промислових установок потрібні дуже потужні магнітні системи.
2. Досліджено використання МГД-ефекту у якості МГД-рушія та виявлено, створення установки з постійними магнітами дає можливість досягти значень ККД МГД-рушія лише не більше кількох відсотків.
3. Встановлено, що для отримання ККД 30% і вище потрібні магнітні поля з індукцією  $B \geq 10$  Тл.
4. Проведено аналіз різних видів магнітних систем для МГД-каналу, та обрано найбільш оптимальну – магнітна система з магнітопроводом без повітряних зазорів відносно аксіальних поверхонь магнітів.
5. Спроековано магнітну систему з магнітопроводом без повітряних зазорів відносно аксіальних поверхонь магнітів з відстанню між магнітами 0,025м, так як саме при такій відстані отримані відносно найкращі показники швидкості потоку, ККД, витрати води та тиску в каналі.
6. Встановлено, що із збільшенням довжини МГД-каналу збільшується значення тиску, швидкості потоку та напору води. Найбільше ККД (0,09%) магнітна система набуває при  $l_1 = 1$  м;  $j_{\text{мв2}} = 500$  А/м<sup>2</sup>.
7. Встановлено, що якщо знехтувати втратами тиску під час течії в каналі, то збільшення густини струму одночасно призводить до зменшення ККД та збільшення витрат води в МГД-каналі.
8. Розглянуто вплив електричного струму на морську воду, та наведено методи очищення морської води від хлору.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Башкатов В.А., Орлов П.П., Федосов М.І. Гідрореактивні пропульсивні установки. Л., "Суднобудування", 1977. – 236 с.
2. Ватажин А.Б., Любимов Г.А., Регіпер С.А. Магнітогідродинамічні течії в каналах. М., Фізматгіз. 1970. – 138 с.
3. Зенкевич В.Б., Казовський Е.Я., Кремлев М.Г., Орлов П.П., Сичов В.В., Федосов М.І., Шахтарин В.Н. Надпровідники в судновій техніці. Л., "Суднобудування", 1971. – 234 с.
4. Казовський Е.Я. Надпровідні магнітні системи. Л., "Наука", 1968. – 176 с.
5. Dorach МНД - ship propulsion using superconducting magnets. - Report. SNAME Transactions, 1963, May . 14-15
6. Friauf J. МНД - ship propulsion "Journal of American Society of Naval Engineers", Febr., 1961, № 2.
7. Колодін М.В. Економіка опріснення води. - М.: Наука, 1985. - 128 с.
8. Львович М.І. Світові водні ресурси та їхнє майбутнє. - М.: Думка, 1974.- 488 с.
9. Вольдек А.І. Індукційні магніто-гідродинамічні машини з рідкометалевим робочим тілом. – Л.: Енергія, 1970.
10. Кальнінь Т.К. Явнополюсні МГД-насоси. – Ріга: Зинатне. 1969.
11. Бертинов А.І. Спеціальні електричні машини. – М.: Енерговидав. 1982.
12. Тепловий и гідравлічний розрахунок теплообмінного обладнання АЕС. РД.24.035.05-89, -Л.: НПО ЦКТИ, 1991.
13. Кириллов П.Л., Юр'єв Ю.С., Бобков В.П. Довідник з теплогідравлічних розрахунків (ядерні реактори, теплообмінники, парогенератори). – М.: Енергоатомвидав, 1984, 1990.
14. Петухов Б.С. Теплообмін і опір при ламінарному русі рідини в трубах. – М.: Енергія, 1967.
15. Мігай В.К. Гідравлічний опір трикутних каналів у ламінарному потоці. – Вісник вищих навчальних закладів. Серія: Енергетика, 1963, №5.

16. Суботін В.І., Ібрагімов М.Х., Ушаков П.А. та ін. Гідродинаміка і теплообмін в атомних енергетичних установках. – М.: Атомвидав, 1975.
17. Мазо А.А., Степанов С.В., Кичигін В.І. Екологічні показники способів знешкодження хромвмісних стічних вод і електролітів // Водні ресурси. – 1991. – №3. – С. 201–204.
18. Кожинів В.Ф. Очищення питної та технічної води. Приклади розрахунку. – М.: Машинобудування, 1971. – 363 с.
19. Марков Л.Є., Образцов С.В. Застосування нестационарних методів у електрохімії // Праці Томського політехнічного інституту. – Томськ, 1988. – С. 81.
20. Заболоцький В.І., Письменська Н.Д., Ніконенко В.В. Дослідження електродіалізного знесолення розбавленого розчину електроліту в мембранних каналах // Електрохімія. – 1990. – Т. 26, №6. – С. 707–713.
21. Bette A., Toporoff Th. // Z. phys. Chem. - 1999. - № 88. - P. 868.
22. Manecke G. //Z. phys. Chem. - 1992. - № 210. - P. 1-193.
23. Гельферіх Ф. Іоніти. М.: Вид-цтво іноземної. літ., 2001. - 490 с.