

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Кафедра теплоенергетики та гідроенергетики  
Рівень вищої освіти другий магістерський  
Спеціальність 145 «Гідроенергетика»  
(код та назва)  
Освітня програма Гідроенергетика  
(код та назва)  
Спеціалізація \_\_\_\_\_  
(код та назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ  
Завідувач кафедри \_\_\_\_\_  
« 30 » 06 / 20 21 року

ЗАВДАННЯ  
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ

Івановій Анастасії Сергіївні  
(прізвище, ім'я, по батькові)

Тема роботи Екологічне та економічно-ефективне опалення сучасних житлових будинків

Керівник роботи Осаул Олександр Іванович, канд. техн.наук, доцент  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджено наказом ЗНУ від « 30 » червня 2021 року № 975-с

- 1 Строк подання студентом роботи 03 грудня 2021
- 2 Вихідні дані до роботи площа житлового будинку 9000 м<sup>2</sup>, Автономна лінійна котельня АМК-8, 2 модуля по 2 блока потужністю 900 кВт
- 3 Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Кількість тепла на старті і при запуску, Окисленість і самовартість.
- 4 Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) 7 креслень + 8 таблиць

### 5 Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1	Осаца О.І.	<i>М.О.Осаца</i>	<i>Осаца</i>
2	Осаца О.І.	<i>М.О.Осаца</i>	<i>Осаца</i>

6 Дата видачі завдання \_\_\_\_\_

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Сучасні проблеми побутового опалення	12.05.2021	
2.	Використання кавітації	04.08.2021	
3.	Розрахунок АМК	06.11.2021	
4.	Оформлення пояснювальної записки	01.12.2021	
5.	Гартошовка презентації	03.12.2021	

Студент *Осаца* (підпис) Іванова А.С. (ініціали та прізвище)

Керівник роботи (проекту) *М.О.Осаца* (підпис) Осаца О.І. (ініціали та прізвище)

### Нормоконтроль пройдено

Нормоконтролер *М.О.Осаца* (підпис) Осаца О.І. (ініціали та прізвище)

## АНОТАЦІЯ

Іванова А.С. Екологічне та економічно-ефективне опалення сучасних житлових будинків. Кваліфікаційна випускна робота для здобуття ступеня вищої освіти магістра за спеціальністю 145 – Гідроенергетика, науковий керівник кандидат технічних наук Осаул О.І. Запорізький національний університет, Інженерний навчально-науковий інституті ім. Ю.М. Потебні, кафедра теплоенергетики та гідроенергетики, 2021.

В магістерській роботі вирішено актуальну науково - технічну задачу щодо виробництва теплової енергії шляхом використання нетрадиційних відновлювальних джерел України за допомогою виникаючих кавітаційних ефектів, так званих «кавітаційних пухирців». Досліджено роторний теплогенератор двухконтурного типу з використанням в якості навантаження бака-акумулятора, в якому діаметр диску ротора 550 мм, кількість обертів 2900 об/хв, електродвигун потужністю 90 кВт. В якості теплоносіїв використовується в першому контурі поліметилсилоксанова суміш ПМС-1000, а другому контурі – вода. Наведені в дипломному проекті розрахунки та дослідження відображає реальний вид пристрою, всі запозичені з літературних та інших джерел теоретичні положення супроводжуються посиланнями на їх авторів.

Ключові слова: КАВІТАЦІЙНІ ЕФЕКТИ, КАВІТАЦІЙНІ ПУХИРЦІ, РОТОРНИЙ ТЕПЛОГЕНЕРАТОР, РОТОР, ЕЛЕКТРОДВИГУН, ПОЛІМЕТІЛСИЛОКСАНОВА СУМІШ ПМС-1000.

## ANNOTATION

Ivanova A.S. Research of Heat Pump Efficient Use on the Dnieper Hydroelectric Power Station Reservoir.

Qualification final work for obtaining a master's degree in the specialty 145 - Hydro Power Engineering, supervisor candidate tech. sciences O.I. Osaul. Institute named after Y.M. Potebny, Department of Thermal power Engineering and Hydro Power Engineering, 2021.

In the master 's work the actual scientific and technical problem concerning production of thermal energy by use of non - traditional renewable sources of Ukraine by means of the arising cavitation effects, so - called "cavitation bubbles" is solved. The rotary heat generator of double-circuit type with use as loading of the accumulator tank in which diameter of a disk of a rotor is 550 mm, number of turns of 2900 rpm, the electric motor with a power of 90 kW is investigated. Polymethylsiloxane mixture PMS-1000 is used as a heat carrier in the first circuit, and water is used in the second circuit. The calculations and research given in the diploma project reflect the real type of the device, all theoretical positions borrowed from literature and other sources are accompanied by references to their authors.

Key words: CAVITATION EFFECTS, CAVITATION BUBBLES, ROTOR HEAT GENERATOR, ROTOR, ELECTRIC MOTOR, POLYMETHYL SILOXANE MIXTURE, PMS-1000.

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
РОЗДІЛ 1. СУЧАСНІ ПРОБЛЕМИ ПОБУТОВОГО ОПАЛЕННЯ В ЖИТЛОВО-КОМУНАЛЬНОМУ ГОСПОДІРСТВІ УКРАЇНИ.....	9
1.1 Аналіз енергоємності продукції та послуг ЖКГ.....	10
1.2 Впровадження нетрадиційних та відновлювальних джерел енергії в Україні.....	18
1.2.1 Характеристика альтернативних джерел енергії. Їх переваги і недоліки.....	18
1.2.1.1 Вітрова енергія.....	18
1.2.1.2 Енергія сонця.....	19
1.2.1.3 Мала гідроенергетика.....	20
1.2.1.4 Біопаливо і біомаса.....	21
1.2.1.5 Геотермальна енергетика.....	22
1.2 Рекомендації щодо екологізації паливно-енергетичного комплексу в Україні.....	23
1.3 Внутрішня енергія речовини.....	25
1.4 Термодинаміка як основа процесів теплообміну.....	27
1.5 Використання кавітації.....	30
1.6 Динаміка обертального руху.....	53
1.7 Вихровий рух рідини.....	36
1.8 Теплоізоляційні матеріали та виробы.....	57
РОЗДІЛ 2. РОЗРАХУНОК АМК.....	60
2.1 Основні елементи пристрою АМК та описання його функцій.....	65
2.2 Гідравлічні розрахунки АМК.....	65
2.3 Вибір електродвигунів.....	68
2.4 Мікропроцесорна схема керування.....	69
2.5. Економічні розрахунки АМК.....	72
ВИСНОВОК.....	77
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ.....	78

## ВСТУП

*Актуальність теми.* Але ми досі не маємо цілісної, системно-стратегічно узгодженої концепції розвитку енергетики, зокрема електроенергетики, поточні та перспективні проблеми якої групуються у два основних пакети: організація діяльності та технологічне забезпечення. Вирішення поставленої проблеми полягає в розробці пристрою для виробництва і передачі тепла, в якому за рахунок мінімального гідравлічного супротиву теплогенератор і теплообмінник об'єднанні трубопроводами з тангенціальним підводом теплоносія.

Пристрій буде розроблений для екологічного та економічно-ефективного опалення сучасних житлових будинків з метою заощадити електроенергетику та теплоенергетику України. Підвищення енергетичних та теплоенергетичних показників в нинішній час за допомогою застосування нетрадиційних відновлювальних джерел України вимагає використання сучасних покращених пристроїв виробництва електроенергії та теплоенергії, що саме і робить дату тему актуальною.

*Метою дипломної роботи* є розробка проекту пристрою для створення штучної кавітації та виникаючих кавітаційних ефектів для інтенсифікації фізичних процесів в різних галузях промисловості.

*Об'єктом дослідження* є лабораторний корпус Запорізького навчально-наукового інституту, де саме і пропоную встановити пристрій для економічного та екологічно-ефективного опалення.

*Предметом досліджень* є роторний теплогенератор двухконтурного типу з використанням в якості навантаження бака-акумулятора, в якому діаметр диску ротора 550 мм, кількість обертів 2900 об/хв, електродвигун потужністю 37 кВт. В якості теплоносіїв використовується в першому контурі поліметилсилоксанова суміш ПМС-1000, а другому контурі – вода.

*Наукова новизна* є в запропонованій заявці на корисну модель «Автономна міні котельня», де наведені рішення і нові оптимальні елементи,

які в кінцевому результаті разом складають заявлений удосконалений енергетичний пристрій, що забезпечує якісне надання теплової енергії.

*Практична цінність роботи* полягає в наступному:

Розроблений пристрій може бути використаний в якості автономної міні котельні для передачі тепла у житлових будинках для екологічного та ефективно-економічного опалення.

*Методи дослідження.* В дипломній роботі задачі вирішувались шляхом аналізу літературних джерел згідно теми магістерської роботи; визначення показників енергепостачання та тепlopостачання згідно пошуку для розробки оптимального варіанту пристрою; розрахунку техніко-економічних показників та затрат у використанні.

*Особистий внесок здобувача.* Теоретичні та експериментальні дослідження виконані безпосередньо автором спільно з керівником роботи. Автору належить аналіз результатів дослідження, виконання креслень, розрахунків та формування висновків за результатами проведених досліджень.

*Апробація роботи.* Положення роботи викладені на VI міжнародній науковій інтернет-конференції «сучасні наукові дослідження: досягнення, інновації та перспективи», що проходила у Берліні та на LXXIV науковій конференції «Актуальні дослідження в сучасному світі », що проходила у Переяславі.

*Структура та обсяг роботи.* Структура та обсяг роботи. Магістерська робота включає в себе вступ, два розділи, висновки та перелік джерел посилань з 55 позиції. Загальний обсяг складає 81 сторінку, у тому числі 19 ілюстрацій та 4 таблиці

## РОЗДІЛ 1. СУЧАСНІ ПРОБЛЕМИ ПОБУТОВОГО ОПАЛЕННЯ В ЖИТЛОВО-КОМУНАЛЬНОМУ ГОСПОДАРСТВІ УКРАЇНИ

Багато проблем, що утворюються в житлово-комунальному господарстві (ЖКГ), призводять до необхідності глобальних змін в цій сфері. З 1989 року проявляється не велика ефективність проведених реформ, тобто майже не відбувається змін та покращення ситуації у виробництві та споживанні житлово-комунальних послуг, ні в частині надання населенню якісних послуг, ні в частині оплати житлово-комунальних послуг по оптимальним цінам і тарифам.

В ході проведених досліджень було виявлено, що разом з ринком товарів народного споживання, хліба, нафтопродуктів, енергоносіїв знаходиться не менш важливий ринок комунальних послуг, який є фундаментальним підґрунтям народногосподарського комплексу і розвитку суспільства. Нажаль останнім часом, негативні тенденції які існують на таких ринках прослідковуються в кожній галузі народного господарства України. Якщо розглянути структуру витрат більшої частини українських громадян, то після вартості продуктів харчування житлово-комунальні послуги займають друге місце. Отже, реформування ЖКГ є однією з найбільш актуальних проблем, тому що вона стосується інтересів як населення, так і всього народного господарства України.

Вже протягом 14 років спостерігаються спроби вирішити проблеми в житлово-комунальному господарстві України, виявляючи позитивні і негативні тенденції. Поштовхом до зацікавленості вчених ЖКГ стали проблеми, які гальмують економіку України, питання функціонування підприємств цієї галузі народного господарства, існуючий витратний механізм формування тарифів на комунальні послуги та необхідність поліпшення інвестиційного клімату з метою спрямування коштів на розвиток даної сфери. Отже, дослідження особливостей формування тарифів на



послуги житлово-комунального господарства актуальне в складних умовах сьогодення.

Виходячи з характеру ситуації на ринку енергоресурсів, специфіки функціонування житлово-комунального господарства (ЖКГ) та стану житлово-комунальної енергопостачальної інфраструктури можна сформулювати критерії оцінки організаційно-економічних та технічних рішень з енергозбереження в житлово-комунальній сфері. На мій погляд це:

-кардинальне скорочення об'ємів енергоспоживання вже в короткостроковій перспективі при темпах скорочення, які були б рівнозначні темпам зростання цін на енергоносії.

-збільшення долі нетрадиційних та відновлювальних джерел енергії в енергозабезпеченні підприємств житлово-комунального сектору та побуту.

-забезпечення такого рівня рентабельності надання послуг з постачання енергетичних ресурсів, який забезпечував би самокупність та самофінансування підприємств ЖКГ.

-забезпечення високих соціальних стандартів з надання населенню послуг енергопостачання, що означає підвищення якості надання послуг при мінімізації вартості для споживачів.

### 1.1. Аналіз енергоємності продукції та послуг ЖКГ

Загалом по Україні в 2013 році експлуатувалось 35402 котельні сумарною потужністю 114033,1 Гкал/год. З них на твердому паливі працювало 9865 котелень, на рідкому паливі – 326, на газу – 24462. Загальна характеристика теплового господарства України зображена на рисунку 1.1.

Із 79908 установлених котлів 15644 котли (19,6 %) експлуатуються понад 20 років.

У цілому по Україні протяжність теплових мереж у двотрубному обчисленні становить 31314,1 км (за рахунок схем оптимізації

централізованого опалення та децентралізації протяжність теплових мереж зменшилася на 1114,7 км (у двотрубному обчисленні) або на 3 %), з них ветхих та аварійних – 5952,6 км (19%).

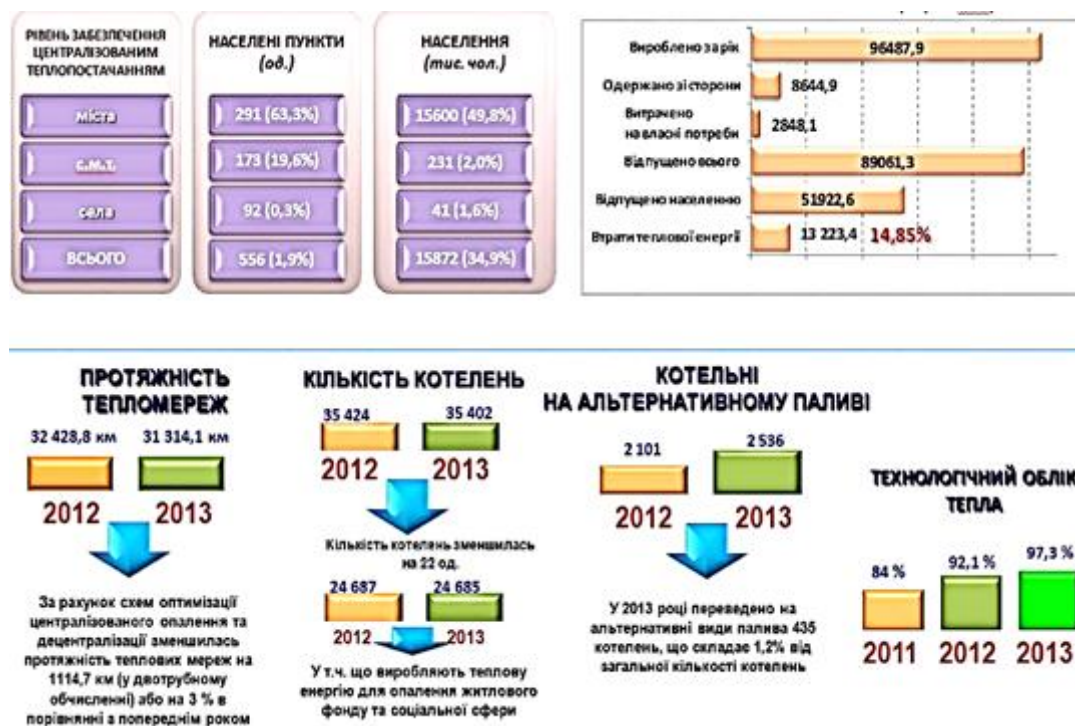


Рисунок 1.1 - Загальна характеристика теплового господарства України

У 2013 році переведено на альтернативні види палива 435 котелень, що складає 1,2% від загальної кількості котелень. Загальна кількість котелень, що працюють на альтернативних видах палива – 236 од. у 2013 році.

Загальні обсяги теплопостачання по Україні склали 89 млн. Гкал., у т.ч. населенню – 51,9 млн. Гкал, на комунально-побутові потреби – 20,6 млн. Гкал, на виробничі потреби – 10,3 млн. Гкал, іншому підприємству – 6,2 млн. Гкал.

Витрати умовного палива на відпуск теплової енергії у 2013 році становили 15094,7 тис. тонн.

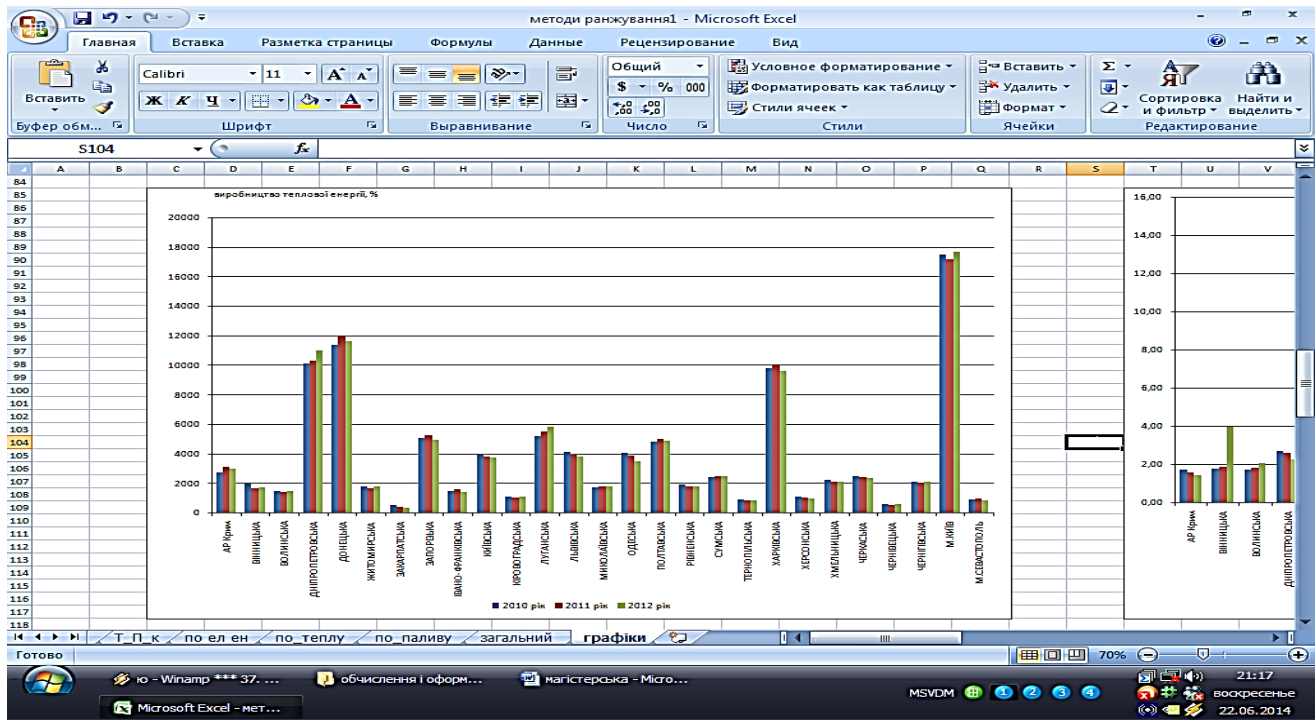


Рисунок 1.2 - Тенденція зміни виробництва теплової енергії в по областях України

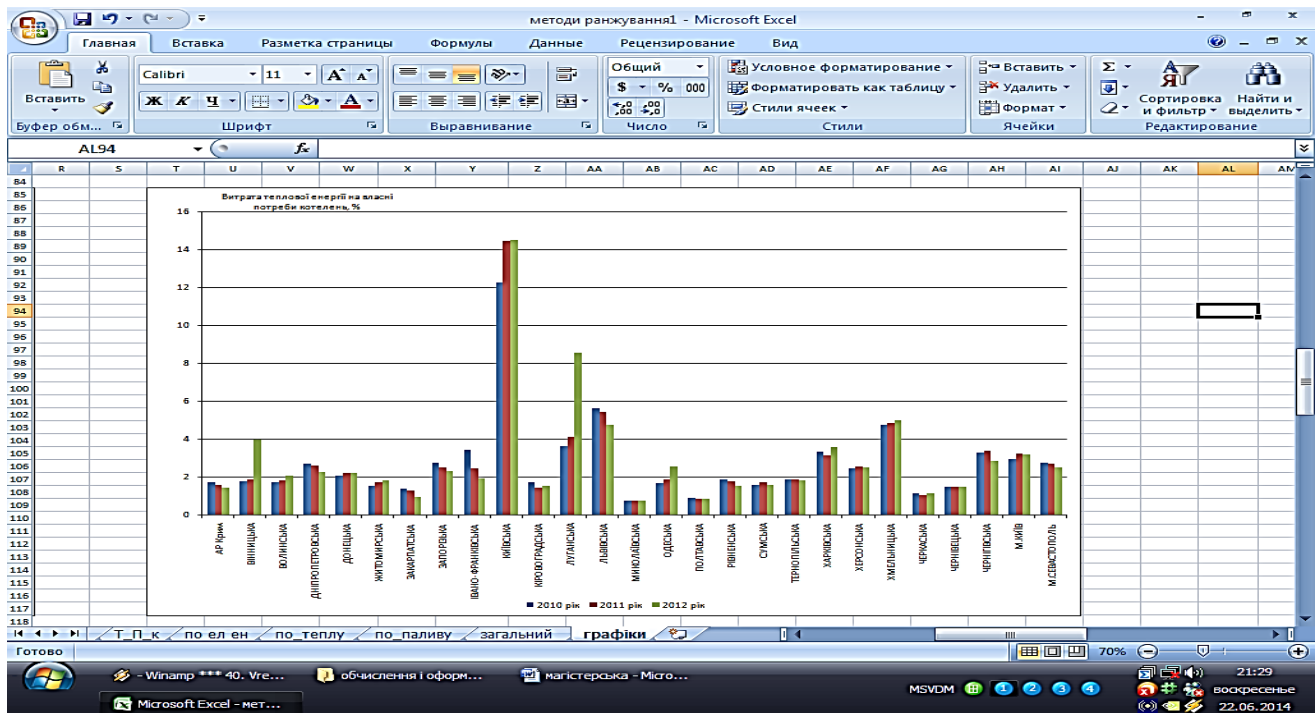


Рисунок 1.3 - Динаміка зміни фактичних витрат теплової енергії котелень на власні потреби по областях України

Втрати теплової енергії в інженерних мережах за 2013 рік зафіксовано в обсязі 13,2 млн. Гкал, що складає 14,85 % від загальної кількості реалізованої теплової енергії, що зображено на рисунку 1.4.

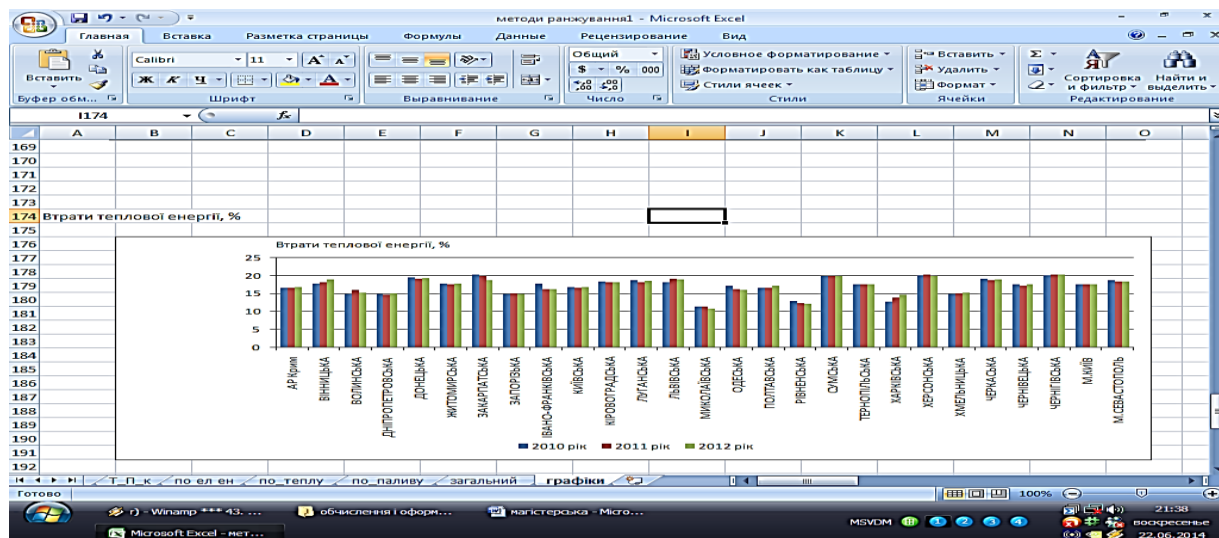


Рисунок 1.4 - Динаміка втрат теплової енергії по областях України

У 2013 році по країні було підготовлено до роботи в зимових умовах 2013-2014 років 24474 котельні, які здійснювали теплопостачання житлового фонду та об'єктів соціальної сфери, у тому числі 13322 комунальні котельні, було підготовлено 5825 центральних теплових пунктів, заготовлено 43741 тону вугілля, створено необхідні запаси рідкого палива в обсязі 88873,14 тонн.

За рахунок коштів у обсязі понад 1 млрд.грн. загалом у 2013 році було:

- реконструйовано 677 котелень;
- замінено 1131 котлів;
- капітально відремонтовано 1073 котлів;
- замінено 520 км теплових мереж.

Із зазначених заходів 1808 є енергоощадними проектами, з них:

- 1373 проекти з модернізації та реконструкції обладнання, що експлуатується;

- 435 проектів із заміщення споживання газу альтернативними видами палива, які дозволяють економити газ.

За рахунок проведених заходів споживання природного газу за підсумками опалювального сезону було скорочено на 5%.

Проведення цих заходів також дозволило:

- покращити якість послуг опалення;
- зменшити аварійність та забезпечити надійність роботи;
- скоротити втрати теплоносія під час експлуатації;
- зменшити витрати підприємств ТКЕ на утримання аварійних служб.

Станом на 01.01.2014 року кількість джерел теплової енергії, на які планувалося встановити засоби обліку відпуску теплової енергії становить 6244 од. Вже встановлено 6075 засобів обліку відпуску теплової енергії.

Котли працюють з низьким (70...80) % коефіцієнтом корисної дії. На котлах встановлені застарілі пальникові пристрої і автоматика, що не дає можливості економно використовувати природний газ. Перевитрата газу на цих котлах досягає (10...30) % порівняно з сучасними котлами і приводить до додаткового забруднення атмосфери.

Великі втрати тепла обумовлює якість теплотрас через незадовільну теплову ізоляцію трубопроводів та розриви труб з витоками теплоносія.

Більшість теплотрас прокладено в непрохідних залізобетонних каналах з ізоляцією з мінеральної вати, яка часто пошкоджується з різних причин. Теплотраси не всюди захищені від проникнення ґрунтових і інших вод, які замочують застарілу теплоізоляцію, призводять до її пошкодження і, внаслідок, до корозії металу труб і появи свищів і розриву труб з витоком теплоносія.

До перебоїв у гарячому водопостачанні та перевитрат теплової енергії призводить застаріле обладнання центральних теплових пунктів (ЦТП) та дуже повільне оснащення будинків споживачів індивідуальними тепловими пунктами (ІТП). Технічний рівень системи теплопостачання і обладнання

через нестачу коштів оновлюється недостатньо, що забезпечує його технічне і моральне старіння та швидку ходу до остаточного руйнування.

Основними причинами, які обумовлюють завищене електроспоживання, яке веде до підвищення питомої норми на відпуск теплової енергії є: невідповідність котлів та насосів умовам їх роботи; відсутність регулювання витрат протягом доби а також значні витрати енергоресурсів на технологічні потреби, втрати теплової енергії в мережах підприємства внаслідок витоків і аварій, не обліковані витрати теплоносія.

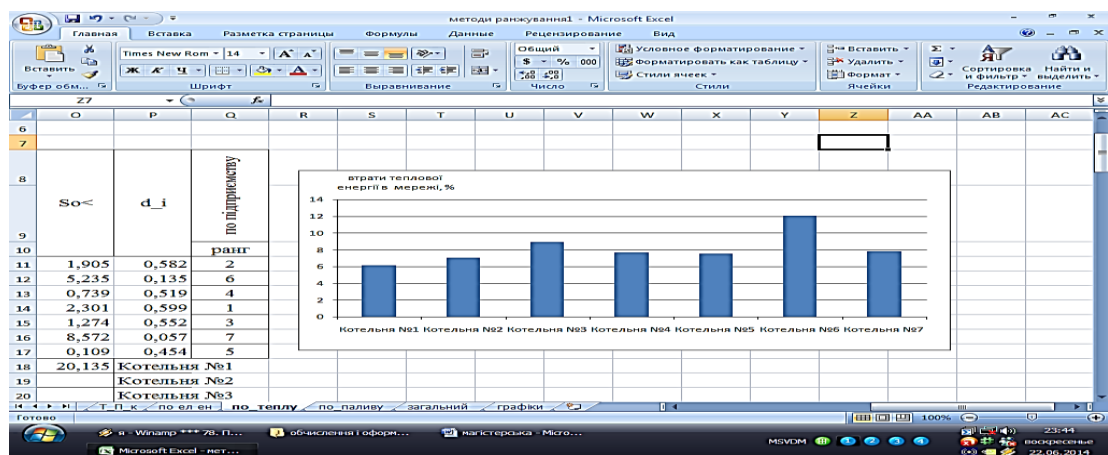


Рисунок 1.5 - Діаграма втрат теплової енергії в мережах підприємства ДКП «Луцьктепло» за 2013 рік

Вивчення стану підприємства тепlopостачання ДКП «Луцьктепло», показує, що основними засобами розв'язання проблеми підвищення рівня енергоефективності слід вважати: заміну старих малоефективних котлів на нові з ККД не нижче 93 %; заміну застарілих пальників на сучасні з автоматизацією процесів згорання природного газу в котлі; встановлення утилізаторів теплоти за котлами тепловою потужністю від 4 МВт і вище; впровадження технології комбінованого виробництва теплової та електричної енергії в котельнях; використання електроопалення; встановлення теплових насосів; заміщення природного газу біопаливом; заміщення природного газу водовугільним паливом; використання сонячної

енергії; використання синтез-газу; заміну зношених труб теплових мереж на попередньо ізолювані; встановлення автоматизованих індивідуальних теплових пунктів; впровадження сучасних приладів та систем діагностики на об'єктах комунальної теплоенергетики.

## 1.2. Впровадження нетрадиційних та відновлювальних джерел енергії в Україні

Нетрадиційні та відновлювані джерела енергії останнім часом стали одним із важливих критеріїв сталого розвитку світової спільноти. Здійснюється пошук нових і вдосконалення існуючих технологій, виведення їх до економічно ефективного рівня та розширення сфер використання.

Головними причинами такої уваги є очікуване вичерпання запасів органічних видів палива, різке зростання їх ціни, недосконалість та низька ефективність технологій їхнього використання, шкідливий вплив на довкілля, наслідки якого все більше і більше турбують світову спільноту.

До нетрадиційних відновлюваних джерел енергії (НВДЕ) відносять, геотермальну, сонячну, фотоелектричну та теплову енергію, енергії припливів, хвиль океану, вітру, тверду біомасу, гази з біомаси, рідкі біопалива та відновлювані муніципальні відходи, а також теплову енергію, що «створюється» завдяки тепловим насосам, торф, шахтний метан та вторинні джерела енергії, такі як: скидне тепло, промислові відходи, тиск доменного газу та природного газу під час його транспортування.

На сьогодні частка нетрадиційних відновлюваних джерел енергії у виробництві енергії у світі ще не є значною, але їх потенціал на кілька порядків перевищує рівень світового споживання паливно-енергетичних ресурсів. Темпи зростання обсягів виробництва енергії нетрадиційних відновлюваних джерел енергії також значно перевищують аналогічні для традиційних видів енергії. Так, у найближчі 10 років, прогнозується щорічне зростання світових обсягів виробництва електроенергії традиційної

електроенергетики на рівні 2,8 %, а електроенергії нетрадиційних відновлюваних джерел енергії – 9,2 %.

В Україні також існує значний потенціал використання нетрадиційних відновлюваних джерел енергії. З іншого боку, проблеми ефективності використання традиційних джерел енергії в Україні стоять ще гостріше, ніж у світі чи країнах ЄС. Причинами цього є застарілі технології, вичерпання ресурсів використання основних фондів генерації електроенергії і тепла, що разом з низькою ефективністю використання палива призводить до значних обсягів викидів шкідливих речовин. Значні втрати при транспортуванні, розподілі та використанні електроенергії і тепла, а також монопольна залежність від імпорту енергоносіїв ще більш ускладнюють ситуацію на енергетичних ринках країни.

Таким чином, Україна має нагальну потребу у переході до енергетично ефективних та екологічно чистих технологій, якими є, в тому числі, і нетрадиційних відновлюваних джерел енергії. Але, незважаючи на декларативні заяви щодо усвідомлення цієї потреби з боку різних гілок влади та низку нормативно-законодавчих актів, які стосуються розвитку нетрадиційних відновлюваних джерел енергії, – реальних кроків щодо впровадження нетрадиційних відновлюваних джерел енергії зроблено досить мало. Частка нетрадиційних відновлюваних джерел енергії в енергетичному балансі країни становить лише 7,2 % (6,4 % - позабалансові джерела енергії; 0,8 % - відновлювані джерела)

Змінити ситуацію можна шляхом проведення відповідної енергетичної політики, вдосконалення нормативно-правової бази та залучення інвестицій у розвиток нетрадиційних відновлюваних джерел енергії. Звісно, що цей процес не є швидким, але задля забезпечення майбутнього економічного процвітання України, її гідного місця у Європейській спільноті потрібно вже сьогодні активізувати вирішення цієї актуальної проблеми [1].



### 1.2.1. Характеристика альтернативних джерел енергії. Їх переваги і недоліки

Зсилаючись на матеріал спільноти фахівців-екологів «Промислова екологія» можна виділити конкретну класифікацію альтернативних джерел енергії та розібрати їх переваги та недоліки.

Розглянемо більш детально кожен складову альтернативних джерел.

#### 1.2.1.1 Вітрова енергія.

Вітроенергетика – галузь відновлюваної енергетики, яка спеціалізується на використанні кінетичної енергії вітру. Цей вид джерела енергії є непрямою формою сонячної енергії, і, тому, належить до відновлюваних джерел енергії. Зараз вітер використовується для видобутку електроенергії. Хоча ціна (на 2007р.) 1 Квт-години видобутої з енергії вітру порівняно невисока – 4 центи – але всі проекти по будівництву нових вітряків зазвичай дуже повільно окуповують себе.

Джерело вітроенергетики – сонце, так як воно є відповідальним за утворення вітру. Від загальної кількості енергії сонця 1-2% перетворюється на енергію вітру. Ця кількість вп'ятеро перевищує річну світову енергетичну потребу. Сучасна технологія дозволяє використовувати тільки горизонтальні вітри, що знаходяться близько до поверхні землі та мають швидкість від 12 до 65 км/год.

Для того, щоб будівництво вітроелектростанції виявилось економічно виправданим, необхідно, щоб середньорічна швидкість вітру в даному районі складала не менш 6 метрів за секунду. У нашій країні вітряки можна будувати на узбережжях Чорного і Азовського морів, у степових районах, а також у горах Криму і Карпат.

Переваги. Вітрова енергетика є екологічно чистим способом вироблення енергії. Вона не забруднює атмосферу, не споживає палива і не спричинює

теплового забруднення довкілля. Максимальне ефективне використання енергії вітру в Україні, дасть можливість щорічно виробляючи 5,71 млн. МВт-год, забезпечити 2,5 % загального річного електроспоживання в Україні.

Недоліки. Вітрові електростанції створюють шум високої частоти, тому потребують великих земельних ділянок для свого розміщення, а також заважають близьким населеним пунктам. Є ще один вид впливу вітрової енергетики: генератори великих вітродвигунів обертаються зі швидкістю близько 30 обертів за секунду. Це близько до частоти синхронізації телебачення. Тому великі вітродвигуни можуть заважати прийому передач на відстані до 1,6 км.

#### 1.2.1.2 Енергія Сонця.

Сонячна енергетика – використання сонячної енергії для отримання енергії в будь-якому зручному для її використання вигляді. Сонячна енергетика використовує поновлюване джерело енергії і в перспективі може стати екологічно чистою, тобто такою, що не виробляє шкідливих відходів.

Сьогодні для перетворення сонячного випромінювання в електричну енергію існує дві можливості: використовувати сонячну енергію як джерело тепла для вироблення електроенергії традиційними способами (наприклад, за допомогою турбогенераторів) або ж безпосередньо перетворювати сонячну енергію в електричний струм в сонячних елементах. Сонячну енергію використовують також після її концентрації за допомогою дзеркал – для плавлення речовин, дистиляції води, нагріву, опалювання і т.д.

Сонячні фотоелементи вже сьогодні знаходять своє специфічне застосування. Вони виявилися практично незамінними джерелами електричного струму в ракетах, супутниках і автоматичних міжпланетних станціях, а на Землі – в першу чергу для живлення телефонних мереж в не

електрифікованих районах або ж для малих споживачів струму (радіоапаратура, електричні бритви і запальнички і т.п.).

Переваги сонячної енергетики: загальнодоступність і невичерпність джерела; теоретично, повна безпека для навколишнього середовища (проте в даний час у виробництві фотоелементів і в них самих використовуються шкідливі речовини).

Недоліки сонячної енергетики:

- через відносно невелику величину сонячної постійної для сонячної енергетики потрібне використання великих площ землі під електростанції, але фотоелектричні елементи на великих сонячних електростанціях встановлюються на висоті 1,8—2,5 метра, що дозволяє використовувати землі під електростанцією для сільськогосподарських потреб, наприклад, для випасу худоби;
- потік сонячної енергії на поверхні Землі сильно залежить від широти і клімату. У різних місцевостях середня кількість сонячних днів в році може дуже сильно відрізнятися;
- залежність потужності сонячної електростанції від часу доби і погодних умов;
- висока ціна сонячних фотоелементів (але, в 1990-2005 рр. ціни на фотоелементи знижувалися в середньому на 4 % на рік);
- не дивлячись на екологічну чистоту отримуваної енергії, самі фотоелементи містять отруйні речовини, наприклад, свинець, кадмій, галій, миш'як і т. д., а їх виробництво споживає масу інших небезпечних речовин.

### 1.2.1.3 Мала гідроенергетика

Мала гідроенергетика є технологічно освоєним способом виробництва електроенергії, що має досить гарантований поновлюваний енергоресурс та найменшу собівартість виробництва електроенергії серед традиційних паливних і більшості нетрадиційних технологій її виробництва.

Освоєння потенціалу малих річок з використанням малих та мікроГЕС допомагає вирішити проблему покращення енергозабезпечення споживачів. Найбільш ефективними є малі ГЕС, що створюються на існуючих гідротехнічних спорудах.

Переваги гідроелектростанцій очевидні – постійно поновлюваний самою природою запас енергії, простота експлуатації, відсутність забруднення навколишнього середовища, поліпшення умови роботи річкового транспорту. Недоліком виступають затоплення територій, так на Дніпрі, наприклад, водосховищами затоплено величезні площі най родючіших земель в Європі: Київським – 922 квадратних кілометрів, Канівським – 675, Кременчуцьким – 2250, Дніпродзержинським – 567, Дністровським – 410, Каховським – 2155 кілометрів квадратних.

#### 1.2.1.4 Біопаливо та біомаса

Біопаливо або біологічне паливо – органічні матеріали, такі як деревина, відходи та спирти, що використовуються для виробництва енергії. Офіційне визначення біопалива – будь-яке паливо мінімум з 80 % вмістом (за об'ємом) матеріалів, отриманих від живих організмів, зібраних в межах десяти років перед виробництвом.

До біомаси входять не тільки рослинна органічна речовина (зернові культури, кукурудза, соняшник, відходи деревини), але й гній, газ звалищ. При цьому установки анаеробної переробки біомаси з отримання біогазу, тобто біогазові установки виконують також роль очисних споруд, бо переробляють органічні відходи у нейтральні мінеральні продукти. Якщо установки для використання вітрової, сонячної енергії є пасивно чистими, то біогазові установки є активно чистими, бо усувають екологічну небезпеку тих продуктів, які й використовують у якості джерела енергії. Наприклад, технологія метанового зброджування гною дозволяє отримувати біогаз і усуває бактеріальне, хімічне забруднення ґрунту, води, повітря, що

відбувається у накопичувачах гною. При цьому виробляються високоякісні добрива, білково-вітамінні кормові добавки, тому вона є безвідходною.

Переваги: використовуючи практично відходи виробництв, маємо можливість отримувати екологічно чисте пальне.

Недоліків використання біопалива фактично немає, тільки вчені встановили, що неефективно виготовляти біодизель з ріпакової олії, тому що для заправки одного авто протягом року, необхідно приблизно 1500 літрів олії, а це ділянка землі з футбольне поле при врожайності ріпаку до 3000 кг/га.

#### 1.2.1.5 Геотермальна енергетика

Геотермальна енергія (природне тепло Землі), акумульована в перших десятиох кілометрах Земної кори, за оцінкою вчених досягає 137 трлн. тонн умовного палива (т у.п.), що в 10 разів перевищує геологічні ресурси усіх видів палива разом узятих.

З усіх видів геотермальної енергії мають найкращі економічні показники гідрогеотермальні ресурси – термальні води, пароводяні суміші і природна пара.

В Україні прогнозні експлуатаційні ресурси термальних вод за запасами тепла еквівалентні використанню близько 10 млн. т у.п. на рік. Серед перспективних районів для пошуків і розвідки геотермальних ресурсів знаходиться Донецький басейн.

Переваги: геотермальну енергію отримують від джерел тепла з великими температурами, вона має декілька особливостей: температура теплоносія значно менша за температуру при спалюванні палива і найкращий спосіб використання геотермальної енергії – комбінований (видобуток електроенергії та обігрів).

Недоліки: низька термодинамічна якість; необхідність використання тепла біля місця видобування; вартість спорудження свердловин виростає зі збільшенням глибини. [3]

### 1.3 Рекомендації щодо екологізації паливно-енергетичного комплексу в Україні

Невідкладним кроком у напрямку покращення енергетичної ситуації України, зменшення її енергозалежності, а також подальшої інтеграції в Європейську співдружність, повинна стати усебічна підтримка держави розвитку та впровадження альтернативних енергетичних установок у регіонах з найвищими показниками економічної доцільності. Цього можливо досягнути шляхом виконання наступних дій:

- удосконалення низки існуючих законодавчих актів щодо відновлювальних джерел енергії, які б сприяли підвищенню економічної ефективності виробництва альтернативної енергії;
- розробка інвестиційних проектів з метою залучення додаткових вкладень в дану галузь;
- надання гарантій державою виробникам «чистої» енергії щодо її купівлі за фіксованими тарифами;
- забезпечення рівня енергетичної безпеки України завдяки модернізації мережі існуючих енергетичних установок, підвищення рівня їх надійності та безперебійності роботи;
- інформування населення України щодо перспективності використання нетрадиційних джерел енергії, необхідності збереження довкілля та зменшення викидів парникових газів в атмосферу від спалювання традиційних видів палива.

За період 1997-2005 років в Україні заміщено понад 84 млн. тонн у.п. традиційних паливно-енергетичних ресурсів, за рахунок використання енергії виробленої на об'єктах альтернативної енергетики. Тобто доцільно

продовжити термін дії Програми розвитку нетрадиційних відновлюваних джерел енергії до 2030 року.

В цілому виконання програм з енергозбереження, в тому числі програм зі створення об'єктів альтернативної енергетики (Програма НВДЕ), в перспективі може забезпечити для України наступне:

- зміцнення державності України за рахунок підвищення енергетичної та економічної незалежності;
- зниження енергоємності внутрішнього валового продукту;
- досягнення світового рівня ефективного використання паливно-енергетичних ресурсів;
- зменшення обсягів імпорту паливно-енергетичних ресурсів;
- створення ринку енергозберігаючого та науково обладнання, відповідної техніки та технологій;
- технічне та технологічне переоснащення енергоємного виробництва;
- конкурентоздатність вітчизняних товарів;
- підвищення добробуту громадян;
- підвищення рівня зайнятості населення;
- підвищення рівня зайнятості населення;
- підвищення рівня безпеки праці та культури виробництва;
- покращення стану здоров'я людей;
- зменшення обсягів шкідливих викидів у довкілля;
- відтворення природних ресурсів;
- виконання міждержавних угод щодо підвищення рівня екологічної безпеки.

Обнадійливим є також і зростаюче усвідомлення підприємствами нагальної потреби підвищення енергоефективності виробництва у комплексі з екологічною безпекою, отримання енергоносіїв та використання з цієї метою альтернативних джерел, горючих відходів згубних для довкілля, які підлягають знешкодженню, викидів як додаткового джерела енергоресурсів.

### 1.3 Внутрішня енергія речовини

Фахівці-екологи зі спільноти «Промислова екологія» викремили відомі різні форми існування енергії: хімічна, електрична, механічна, ядерна сонячна. Відповідно до різних форм енергії по-різному виявляються й енергетичні. Наприклад, розкласти воду на водень і кисень можна електролізом. Потрібна для цього електрична енергія виділяється внаслідок перебігу окисно-відновних реакцій під час роботи акумулятора. Згоряння магнію супроводжується виділенням теплової та світлової енергії. А розкладання хлориду й бромиду Аргентуму(I) у фотографічному процесі відбувається з поглинанням світлової енергії. Також унаслідок перебігу хімічних реакцій може виконуватись механічна робота – наприклад, під час вибуху або роботи двигуна внутрішнього згоряння.

Вчені вважають, що ці факти доводять існування внутрішньої енергії, яка «прихована» в речовинах і вивільняється під час хімічних процесів. Тобто хімічні акції супроводжуються зміною не тільки складу й будови речовин, а й зміною їхньої внутрішньої енергії.

Енергію, виділену або поглинуту системою під час перебігу в ній реакцій, називають енергетичним ефектом реакції. Він становить різницю між внутрішньою енергією реагентів і продуктів реакції.

Часто внаслідок перетворення одних речовин на інші виділяється або поглинається тепла енергія. Її кількість ( позначають  $\Delta H$ , вимірюють у Дж, кДж тощо) називають тепловим ефектом. Він залежить від природи реагуючих речовин, їхньої кількості та агрегатного стану, тиску тощо).

Прихована внутрішня енергія речовини – це повна кінетична енергія руху всіх її компонентів та потенційна енергія структури, тобто енергія всіх міжмолекулярних і внутрішньо молекулярних фізико-хімічних зв'язків речовини. Іншими словами, це повна потенційна та кінетична енергія всіх складників речовини (електронів, фотонів, атомів, молекул та ін.) Кількість внутрішньої енергії будь-якої речовини, у тому числі і рідини,



характеризується масою. Повна внутрішня енергія  $E$  тіла вимірюється формулою Ейнштейна та пропорційна релятивістській масі  $m$  (закон взаємозв'язку маси й енергії)

де  $c$  – швидкість світла у вакуумі,  $m$  – маса речовини.

Релятивістська маса залежить від швидкості  $v$ , з якою тіло(частка) рухається в даній системі відліку. Тому енергія різна в різних системах відліку. Найменшою енергією тіло (частка) володіє в системі відліку, щодо якої воно спочиває ( ). Енергія називається *власною енергією* або *енергією спокою тіла* (частки)

Енергія спокою тіла є його внутрішньою енергією. Вона складається із суми енергій спокою всіх часток тіла , кінетичної енергії всіх часток щодо загального центра мас і потенційної енергії їхньої взаємодії. Тому

$$E_0 = m_0 c^2 + \sum_i E_{kin,i} + E_{pot}$$

де  $m_0$  – маса спокою.

У релятивістській механіці несправедливий закон збереження маси спокою. Наприклад, маса спокою атомного ядра менше, ніж сума власних мас часток, що входять у ядро. Навпаки маса спокою частки, здатної до мимовільного розпаду, більше суми власних мас продуктів розпаду і

Незбереження маси спокою не означає порушення закону збереження маси взагалі. У теорії відносності справедливий закон збереження релятивістської маси. Він випливає з формули закону взаємозв'язку маси й енергії . В ізольованій системі тіл зберігається повна енергія. Отже, зберігається і релятивістська маса. У теорії відносності закони збереження енергії і релятивістської маси взаємозалежні і являють собою єдиний закон збереження маси й енергії. Однак з цього закону аж ніяк не випливає можливість перетворення маси в енергію і назад. Маса й енергія являють

собою дві якісно різних властивості матерії, аж ніяк не «еквівалентних» один одному. Жоден з відомих досвідчених фактів не дає основ для висновку про «перехід маси в енергію». Перетворення енергії системи з однієї форми в іншу супроводжується перетворенням маси. Наприклад, у явищі народження і знищення пари електрон – позитрон, у повній відповідності з законом збереження релятивістської маси й енергії, маса не переходить в енергію. Маса спокою часток (електрона і позитрона) перетвориться в масу фотонів, тобто в масу електромагнітного поля [3].

#### 1.4 Термодинаміка як основа процесів теплообміну

У хімічній, харчовій, газонафтопереробній, гірничо-хімічній, енергетичній та багатьох інших галузях промисловості процеси передачі тепла від нагрітих теплоносіїв до холодних займають провідне місце. Теплові процеси використовуються в промисловості для охолодження нагрітих середовищ, для зрідження повітря та природних газів, для нагрівання холодних теплоносіїв, для проведення процесів випарювання, конденсації, плавлення, кристалізації та ін.

Теоретичною основою теплових процесів є розділ термодинаміки щодо законів перенесення енергії від одного теплоносія до іншого та про механізми такого перенесення.

Перенесення енергії від більш нагрітих середовищ до менш нагрітих відбувається під дією *рушійної сили*, за яку в теплових процесах використовується різниця температур між теплоносіями. Звичайно при досягненні однакових температур між теплоносіями встановлюється рівноважний стан, але такий стан у природі і в техніці є чисто теоретичним, тому що досягнути його можна лише за тривалий час.

Тіла (робочі середовища), що беруть участь у процесах теплообміну, називаються *теплоносіями*. Робоче середовище з більш високою початковою температурою називається *гарячим теплоносієм*, у процесі теплообміну

гарячий теплоносієй віддає теплову енергію, при цьому температура гарячого теплоносія знижується. Робоче середовище з меншою початковою температурою називається *холодним теплоносієм*, у процесі теплообміну тепла енергія передається від гарячого до холодного теплоносія і його температура підвищується. В данному проекті було використано силіконове масло(ПМС-1000), яке має температуру кипіння 317°C. Тобто для використання цього теплоносія достатньо обмежити режим нагріву теплоносія в 1-му контурі температуро 150°C.

Використовувані в промисловості теплообмінні апарати працюють в умовах глибокого вакууму, під помірним або під високим тиском (до 100 МПа), у діапазоні температур від мінус 250°C до +1000°C. Дуже часто в теплообмінниках проходять корозійно активні середовища, що треба враховувати при вибиранні необхідних конструкційних матеріалів.

Вивчення фізико-хімічних основ процесів теплообміну та уміння використовувати отримані знання в розрахунках процесів і обладнання є головним показником кваліфікації інженерів-механіків хімічних і нафтопереробних виробництв.

Відповідно до законів термодинаміки перенесення тепла від нагрітих середовищ до холодних відбувається мимовільно доти, поки існує позитивна різниця температур між гарячим і холодним теплоносієм.

*Локальною рушійною силою процесу теплообміну* є різниця температур між нагрітим і холодним тілом або середовищем у даний момент часу (для періодичного процесу) або різниця температур між гарячим і холодним теплоносієм у локальному перетині апарата (для безперервних процесів). *Середньою рушійною силою процесу* є різниця температур між теплоносіями, що визначена за певний проміжок часу (для нестационарного процесу) або на вхідній та вихідній ділянках апарата (для стаціонарного процесу).

*Поверхнею теплопередачі* називають площу контакту, через яку відбувається передача тепла від гарячого теплоносія до холодного. Окремий

частковий процес перенесення тепла в межах однорідної фази з ядра потоку гарячого теплоносія до поверхні теплопередачі або від нагрітої поверхні у ядро потоку холодного теплоносія називається *теповіддачею*. Процес перенесення тепла з ядра потоку гарячого теплоносія у ядро потоку холодного теплоносія через розділяючу теплоносії стінку (міжфазну границю) називається *теплопередачею*.

Отже, процес теплопередачі є складним і багатостадійним, що вміщує у себе як стадії перенесення тепла (теповіддачу) у межах кожного з теплоносіїв, так і стадії перенесення тепла через границю розділення фаз - поверхню теплопередачі.

В основу процесів теплоперенесення покладений основний кінетичний закон, відповідно до якого швидкість теплопередачі прямо пропорційна рушійній силі та обернено пропорційна термічному опору

$$Q_m = F \Delta t_c / R_m,$$

де  $Q_m$  - кількість переданого тепла, Дж;

$F$  - поверхня теплопередачі, м<sup>2</sup>;

$\tau$  - тривалість процесу, с;

$\Delta t_c$  - середня різниця температур між теплоносіями, К;

$R_m$  - термічний опір процесу теплопередачі.

Для сталого процесу на основі рівняння кінетичного рівняння (кількість переданого тепла за одиницю часу знаходять за формулою

,

де  $Q$  - тепловий потік, Вт;

- $k_m$  - середній для теплового процесу коефіцієнт теплопередачі, що характеризує швидкість процесу теплопередачі,  $k_m = 1/R_m$ .

Цю залежність називають *основним кінетичним рівнянням процесу теплопередачі*.

Величину теплового потоку, агрегатний (фазовий) стан, напрямок, режим і характер руху теплоносіїв уздовж поверхні теплопередачі, величину середньої рушійної сили процесу визначають як швидкість (інтенсивність) і ефективність теплообмінних процесів, так і тип використовуваного теплообмінного обладнання, його геометричні розміри, загальну поверхню теплопередачі та конструктивні особливості.

### 1.5 Використання кавітації

Для збільшення показників теплопередачі від першого до другого контурів в проекті запропоновано використання штучного роторно-цівкового теплогенератора, який являє собою замкнений тепловий реактору вигляді циліндру, в якому на валу двигуна закріплений ротор, а внутрішня поверхня циліндру має гвинтоподібні направляючі треки з рельєфною поверхнею, геометрія якої забезпечує штучне утворення кавітаційних бульбашок. Відповідно достатньо великому обсягу робіт по використанню кавітаційних пристроїв професором Промтовим М.А [4].

Під кавітацією в рідині розуміють утворення заповнених парою і газом порожнин або бульбашок при локальному зниженні тиску рідини до тиску насиченої пари. Співвідношення вмісту газу та пари в порожнині може бути різним (теоретично від нуля до одиниці). Залежно від концентрації пари чи газу порожнини їх називають паровими чи газовими .

Необхідно відзначити, що зниження тиску в рідині до тиску насиченої пари можливе також при кипінні або вакуумуванні рідини. Але ці процеси поширюються по всьому обсягу рідини на відміну від кавітації, яка має обмежену область.

Розрізняють гідродинамічну кавітацію, що виникає за рахунок місцевого зниження тиску в потоці рідини при обтіканні твердого тіла, та

акустичну кавітацію, що виникає при проходженні через рідину акустичних коливань. Кавітаційна каверна, заповнена паром та газом у різних джерелах, називається порожниною, міхуром, бульбашкою, сферою тощо. Будемо вживати ці терміни в залежності від ситуації, тому що вони цілком застосовні і адекватні фізичної сутності кавітації.

Акустична кавітація являє собою ефективний засіб концентрації енергії звукової хвилі низької щільності у високу щільність енергії, пов'язану з пульсаціями та захопуванням кавітаційних бульбашок. Загальна картина утворення кавітаційної бульбашки представляється в такому вигляді.

Загальна картина утворення кавітаційного пухирця представляється у наступному вигляді. У фазі розрідження акустичної хвилі у рідині утворюється розрив у вигляді порожнини, яка заповнюється насиченою паром даної рідини. У фазі стискування під впливом підвищеного тиску і сил поверхневого натягу порожнина захопується, а пара конденсується межі розділу фаз. Через стінки порожнини в неї дифундує розчинений у рідині газ, який потім піддається сильному адіабатичному стиску.

У момент схлопування тиск і температура газу досягають значних величин (за деякими даними до 100 МПа і 10000 °С). Після схлопування порожнини в навколишній рідині поширюється сферична ударна хвиля, що швидко загасає в просторі. У літературі вживаються такі терміни, як захопування, схлопування, анігіляція, колапс і т.д., які позначають одне явище - зменшення радіусу бульбашки  $R$  до мінімального  $R_{min}$  або зменшення радіусу порожнини, її деформацію та розпад на кілька бульбашок.

Для того щоб порожнина утворюлася в рідині, необхідно відокремити сусідні молекули на відстані хоча б вдвічі більше довжини зазору між ними. Рідина витримує максимальне напруження на розтягнення, розраховане за формулою

де  $\sigma$  – поверхневий натяг рідини;  $R$  – радіус бульбашки.

Для води при  $R = 2 \cdot 10^{-10}$  м,  $P = 1000$  МПа, кавітаційна міцність необробленої води не перевищує кількох десятків мегапаскалів. Існує нелінійна залежність у вигляді граничних кривих Еше між частотою акустичної хвилі та пороговим тиском, при якому виникає кавітація. Пороговим тиском називається значення амплітуди акустичного тиску, що викликає розширення зародка до критичного розміру, після якого він починає рости вибухоподібно. Що нижча частота акустичної хвилі, то нижчий пороговий тиск. Наприклад, для частоти 1 кГц пороговий тиск не перевищує  $10^5$  Па при нормальному статичному тиску та температурі ( $P_{\infty} \approx 0,1$  МПа,  $T \approx 20$  °C).

Розбіжність між експериментальною та теоретичною міцністю пояснюється наявністю в реальних рідинах різних примісів та включень, які є зародками кавітації та сильно знижують її міцність. Згідно з теоретичними уявленнями маленькі бульбашки повинні розчинятися в рідині, а великі – спливати. Тим не менш, у рідині постійно присутні бульбашки різного радіусу. Дуже маленькі бульбашки стабілізуються на поверхнях і тріщинах малих твердих частинок, зважених у рідині.

У будь-якій рідині зародки кавітації можуть утворюватися за рахунок заряджених частинок високих енергій, присутніх у космічних променях. Більше 2/3 частинок, пошкоджених космічними променями, становлять  $\mu$ -мезони, інші – переважно електрони. Електрони добре поглинаються в рідинах, а  $\mu$ -мезони оголошуються слабо, але мають велику проникаючу здатність. Проходячи через речовини, електрони та  $\mu$ -мезони взаємодіють з електронами атомів речовини та вибивають їх, витрачаючи на іонізацію певну енергію. Внаслідок локального виділення тепла, в яке переходить енергія, що втрачається електронами, в рідині утворюються парові бульбашки. Якщо тиск у рідині більший за тиск насиченої пари при даній температурі, то парові бульбашки, що породжуються іонізуючими частинками високих енергій, будуть швидко зникати. Кавітація на парових

зародках розвивається, або коли тиск у рідині тривалий час менший за тиск насиченої пари, або за рахунок пульсації тиску.

У рідині, внаслідок боунівського руху, мають місце флуктуації внутрішньої структури – області простору з молекулами низької енергії та молекулами високої енергії. В областях з молекулами високої енергії, які називають областями підвищеної мікротемператури, звукові хвилі можуть забезпечити значення напруги, достатні для розриву суцільності рідини.

Стабільне існування парогазових бульбашок пояснюється тим, що на поверхні бульбашки є рівномірно розподілені однойменні заряди, обумовлені іонами, що знаходяться в рідині. Відштовхування цих зарядів запобігає змиканню бульбашки.

Умова рівноваги газової бульбашки в рідині записується у вигляді

де  $P_e$  – тиск, викликаний силами кулонівського відштовхування, Па;  $P_{\text{п}}$  – тиск насиченої пари, Па.

При поширенні в рідині гармонійних коливань без урахування  $P_e$  та дифузії газу через поверхню бульбашки, але з урахуванням ізометричності процесу зростання бульбашки з радіусом  $R$ , рівняння рівноваги записується як

$$P_0 - P_a - \frac{2\sigma}{R} = P_{\text{п}}$$

де  $P_0$  – початковий тиск у бульбашці, Па;  $P_a$  – акустичний тиск, Па;  $R_0$  – початковий радіус бульбашки, м;  $P_{\infty}$  – статичний тиск в рідині, Па;

Бульбашка стійка, поки  $P_a$  не досягає критичного значення  $P_{\text{кр}}$ . При  $P_a \geq P_{\text{кр}}$  бульбашка починає швидко рости, що призводить до розриву суцільності рідини.



Значення критичного радіусу визначається за формулою

$$r_c = \frac{2\sigma}{\rho(\Delta p - \Delta p_{\text{ст}})}$$

З урахуванням того, що тиск насиченої пари значно менший за гідростатичний тиск, рівняння для кавітаційної міцності рідини в залежності від початкового радіусу бульбашки записується у вигляді

$$\frac{1}{r_c} = \frac{2\sigma}{\rho r_c^2 (\Delta p - \Delta p_{\text{ст}})}$$

Для заданого змінного тиску та частоти звукового поля існує мінімальний та максимальний радіус бульбашок, здатних викликати кавітацію. Мінімальний радіус, а максимальний відповідає резонансному радіусу, що визначається за формулою Міннерта

$$r_{\text{рез}} = \frac{1}{\omega} \sqrt{\frac{2\sigma}{\rho(\Delta p - \Delta p_{\text{ст}})}}$$

де  $\gamma = c_p/c_v$  - співвідношення питомих теплоємностей для газу та пари у бульбашці.

Формула може бути використана для гармонійних коливань бульбашки при невеликих амплітудах, для низьких частот звукового поля та великих бульбашок. Для високих частот застосовніша формула, виведення Хабеєвим при обліку фазових переходів і поверхневого натягу, яка описує залежність резонансного радіусу бульбашки від частоти [17]

—,

де  $A_p$  - функція, яка залежить від теплоти пароутворення, щільності, теплопровідності та температури рідини. У міру збільшення частоти акустичного поля, кавітацію викликають тільки бульбашки з більшою  $f_p$  тобто бульбашки меншого радіусу, ніж  $R_p$ .

Поріг кавітації та його частотна залежність визначаються об'ємом рідини. Розмір кавітаційної міцності рідини залежить від найбільшого зародка з усіх наявних обсягом рідини. Імовірність влучення в озвучувану зону зародка більшого розміру зростає зі збільшенням об'єму рідини, що озвучується.

Нелінійне диференціальне рівняння, що описує просту модель сферично-симетричної пульсації газової порожнини радіусів  $r=R(t)$  у полі плоскої звукової хвилі має вигляд

— — — —

Аналітичне рішення цього рівняння отримано Релеєм за найпростіших умов:  $P_\infty = Pa$ ;  $P(R) = 0$ . У цьому випадку рівняння (2.8) переходить у рівняння захлопування порожньої порожнини під дією гідростатичного тиску

— — — —

Час захлопування пустої порожнини визначається з формули Релея

—

Рівняння, що описує зміни радіусу кавітаційної порожнини в полі ультразвукової хвилі, відомо як рівняння Нолтинга-Неппайреса

$$\frac{dR}{dt} = \frac{1}{2} \left( \frac{2R}{\rho} \left( \frac{P_0}{c} - \rho \omega^2 R^3 \right) - \frac{4}{3} \pi R^3 \frac{dP}{dt} \right)^{1/2}$$

Рівняння досить добре описує поведінку кавітаційного пухирця в полі ультразвукової хвилі, але припущення про стисливість рідини не дозволяють правильно оцінити кінцеву стадію захлопування кавітаційної бульбашки.

Динаміку кавітаційного бульбашки з урахуванням стисливості визначає рівняння Херрінг-Флін. Це рівняння більш точно описує динаміку кавітаційного бульбашки з урахуванням стисливості, але неадекватно при швидкостях руху, порівнянних зі швидкістю звуку  $C_0$ , що характерно для кінцевої стадії захлопування бульбашки.

$$\frac{dR}{dt} = \frac{1}{2} \left( \frac{2R}{\rho} \left( \frac{P_0}{c} - \rho \omega^2 R^3 \right) - \frac{4}{3} \pi R^3 \frac{dP}{dt} - \frac{4}{3} \pi R^3 \frac{d^2R}{dt^2} \right)^{1/2}$$

Этот недостаток устранен в уравнении Кирвуда-Бете, выведенного с допущением о сферичности волн конечной амплитуды, образующихся при захлопывании полости

$$\frac{dR}{dt} = \frac{1}{2} \left( \frac{2R}{\rho} \left( \frac{P_0}{c} - \rho \omega^2 R^3 \right) - \frac{4}{3} \pi R^3 \frac{dP}{dt} - \frac{4}{3} \pi R^3 \frac{d^2R}{dt^2} + \frac{4}{3} \pi R^3 \frac{d^3R}{dt^3} \right)^{1/2}$$

$$\frac{A}{B} = \frac{A}{B} = \frac{A}{B} = \frac{A}{B},$$

де  $A, B, n$  - постійні коефіцієнти, для води  $A=300\text{МПа}, B=300\text{ МПа}, n=7$ .

Ці рівняння не вирішуються у загальному вигляді. Їх чисельні рішення отримують для конкретних окремих випадків з певними значеннями частоти і амплітуди звукового поля і величиною початкового розміру бульбашки. Дослідження цих рівнянь зроблено докладно в [11, 15, 16] і показується, що при амплітудах звукового тиску  $P < P_{кр}$  газові бульбашки не захлопуються і пульсують лінійно. Пухирці з  $R < R_{кр}$  пульсують з частотою акустичної хвилі, а при розмірі бульбашки період пусації близький до періоду власних коливань. При  $P > P_{кр}$  рух порожнини стає нестійким і вона закривається у першому позитивному напівперіоді. При подальшому збільшенні  $P$  інерційні сили перешкоджають захлопування бульбашки, і він здійснює одне або кілька коливань, а потім хлопається. Всі ці результати досить добре узгоджуються з експериментом [13, 15, 16].

У початковий момент часу зростання бульбашок відбувається за рахунок зниження тиску в рідині до порогового  $P_{кр}$ , яке менше тиску насиченої пари. Але в полі періодичних коливань відбувається збільшення часу середнього радіусу бульбашки і середньої маси газу в бульбашці. Якісне пояснення цього явища вперше було зроблено Блейком. При періодичних пульсаціях тиску змінюється радіус бульбашки та концентрація газу у ньому. У фазі стиснення їх пляшечки в рідину газ виходить, а у фазі розширення приходить у пляшечку за рахунок дифузії. Так як кількість продифундируючого газу пропорційно площі поверхні, то при нелінійних пульсаціях газових бульбашок потік газу в бульбашку при його розширенні підвищує потік газу з бульбашки при його стиску. За кожен цикл пульсації виникає збільшення маси газу в бульбашці, що призводить до середнього в часі зростання радіусу газової бульбашки. Відбувається як би "випрямлення"

знакозмінного дифузійного потоку газу через поверхню пульсуючого газового бульбашки [17]. Це було названо випрямленою газовою дифузією.

Зростання парових бульбашок при періодичних пульсаціях, що збуджуються зовнішнім полем, а також обумовлено явищем, яке отримало назву випрямленої теплопередачі або випрямленого теплоперенесення [17]. Цей ефект аналогічний випрямленою газовою дифузією. У фазі розрідження акустичного поля при зниженні тиску знижується температура бульбашки і тепло йде від рідини в бульбашку через велику площу поверхні бульбашки, а у фазі стиснення при підвищенні тиску підвищується температура бульбашки і тепло йде з бульбашки в рідину і при цьому прощання поверхні бульбашки мала. У середньому за цикл проявляється нелінійний ефект спрямованого від рідини до бульбашки потоку тепла. Крім того, парова бульбашка при пульсаціях поглинає енергію зовнішнього поля, яка витрачається на випаровування рідини і призводить до додаткового зростання бульбашки [13].

У звичайних умовах не спостерігається чистих газових або парових бульбашок і пляшечку, як правило, заповнений парогазовою сумішшю. Зростання бульбашки у зовнішньому акустичному полі відбувається за рахунок усіх ефектів, описаних вище.

Зростанню парогазової бульбашки перешкоджають приєднана маса рідини, статистичний тиск і тиск поверхневого натягу. Зростання або витіснення кавітаційної бульбашки відбувається при переважанні тих чи інших ефектів. Нелінійність кривої фазної рівноваги призводить до того, що в середньому температура парової бульбашки знижується по відношенню до температури навколишньої рідини, а це викликає потік тепла з рідини в бульбашку, випаровування рідини та зростання бульбашки в середньому за період.

У реченні, що парогазова суміш у реальному кавітаційному бульбашці при адіабатичному стисканні поводить як ідеальний газ, тиск у бульбашці в момент захоплення визначається параметром газотримання  $\alpha$  [18]



Тиск у бульбашці дорівнює

$$\dots$$

де  $0 \leq R_i \leq R_0$ .

Рівняння теплопровідності для газу всередині кавітаційної бульбашки має вигляд

$$\dots$$

де  $\dots$

За результатами чисельних рішень цих рівнянь було зроблено висновок, що теплообмін у процесі схлопування бульбашки виявляється дуже суттєвим, що значно знижує максимальні параметри парогазової суміші всередині кавітаційної бульбашки: швидкості та температуру – більш ніж у 2 рази, а тиск – більш ніж на порядок порівняно з адіабатичним хлопанням. Час схлопування в адіабатичному режимі та з урахуванням теплообміну незначно відрізняється від релеївського часу для порожньої бульбашки.

Мінімальний радіус бульбашки  $R_{min}$  і радіус  $R_c$ , при якому досягається максимальна швидкість при обліку теплообміну, майже вдвічі перевищують відповідні величини для адіабатичного схлопування.

Максимальна швидкість руху стінок бульбашки при обліку теплообмінника (не більше 600 м/с) значно менша за швидкість звуку в рідині ( $c_0 \approx 1500$  м/с), тому внесок доданків, що містять  $dR/dt c_0$  в рівняннях Херрінга-Флінна та Кірквуда-Бете, повинен бути значно меншим, ніж для моделі адіабатичного схлопування [19]. Ці висновки підтверджуються





Зробимо деякі спрощення. Прийmemo, все, що всі бульбашки мають однаковий розмір і зовнішні умови однакові для всіх бульбашок. Отже, кожен з бульбашок кавітаційного кластера хлопається в момент часу  $t_c$  і випромінює хвилю тиску  $P_{кав1}$ , однакову для всіх бульбашок. Загальне вторинне тиск  $P_{кав}$  перебуває як суперпозиція всіх хвиль тиску, взятих у кількості, обмеженій часом поширення хвилі. Виділимо в кавітаційному кластері сферу радіусом  $r$ , що включає безліч кавітаційних бульбашок. У центрі сфери знаходиться аналізований бульбашка.

У розвиненій області кавітації кількість кавітаційних бульбашок перевищує кількість зародків приблизно в 105 разів. Це пояснюється тим, що процес виникнення кавітаційних бульбашок є ланцюговою реакцією [13]. Кавітація, що виникла на одиничному зародку, протягом декількох десятків періодів ультразвукових коливань розвивається в стабільну область, що складається з безлічі кавітаційних бульбашок.

Процес розвитку кавітаційної області представляється так. При захопленні кавітаційний бульбашка може втрачати стійкість і розпадатися на частини, а так як тиск і температура в цей момент в бульбашці максимальні, то тиск і температура парогазової суміші в "уламках", що утворилися, теж підвищені. У фазі розтягування вони легко розширюються і стають новими зародками кавітації, менш міцними, ніж наявні в рідині. Кавітаційні порожнини, що виникли на цих зародках, породжують нові. У середині кавітаційної області йде неприривний процес розмноження та коагуляції кавітаційних бульбашок, причому кавітаційний поріг дещо зменшується, оскільки в режимі, що встановився, роль кавітаційних зародків починають виконувати рівноважні бульбашки, об'єм і газоміст у яких більше, ніж у зародків.

Виділений обсяг  $U$  повинен задовольняти наступним двом вимогам:

- 1) лінійні розміри цього обсягу повинні бути малі в порівнянні з довжиною хвилі, щоб первинний збуджуючий кавітацію звуковий тиск можна було вважати всередині цього обсягу постійним за величиною і синфазним;

2) лінійні розміри цього обсягу повинні бути набагато більшими за розміри кавітаційної бульбашки [22].

Індекс кавітації є міра просторової щільності енергії, а величина пропорційна потенційної енергії, запасеної всіма бульбашками, що містяться в обсязі.

У режимі, за незмінних зовнішніх умов (статичний тиск, температура, газосодержание і т.д.) індекс кавітації є функція координат поля. Розглядаючи в граничному випадку як функцію точки, можна ввести поняття середнього (за обсягом кавітаційної області) індексу кавітації  $\langle K \rangle$ .

Величина  $K$  лежить у межах  $0 < K < 1$ . Нижня межа відповідає відсутності кавітації, верхня межа досягається тільки в локальному обсязі. Усередняти індекс кавітації можна як по області, а й у будь-якому перерізі.

З індексом кавітації пов'язана також вільна ентальпія  $H$  кавітаційних бульбашок [22]

В даний час немає задовільної моделі кавітаційної області, адекватно описує її поведінку і поведінка окремого кавітаційного бульбашки, що належить до неї. Проведення кавітаційної області залежить від багатьох явищ і факторів: розмноження та коагуляція (коалесценція) бульбашок; їхня взаємодія; зміна характеру пульсацій бульбашки за рахунок ударних хвиль та звукового випромінювання сусідніх бульбашок; зміна середніх акустичних властивостей середовища; мікропотоки всередині кавітаційної області та на межі бульбашки; розподіл зародків кавітації; газозміст тощо. На рисунку 1.6 та 1.7 зображені кавітаційні області, утворені в ультразвуковому випромінючі й роторному імпульсно –кавітаційному апараті.

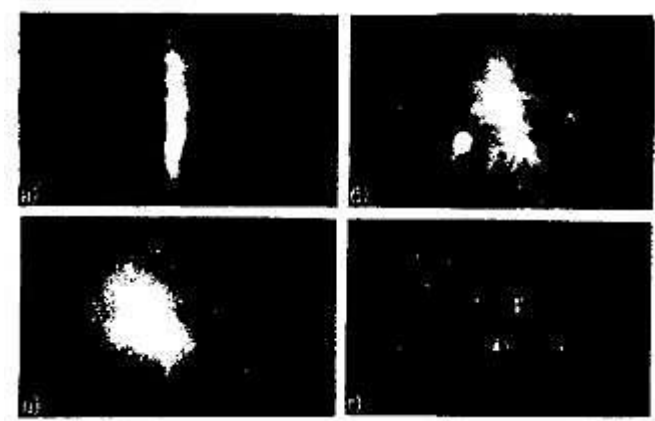


Рисунок 1.6 – Кавітаційна область, утворена над ультразвуковим магнітострикційним випромінювачем при різному статичному тиску [18]

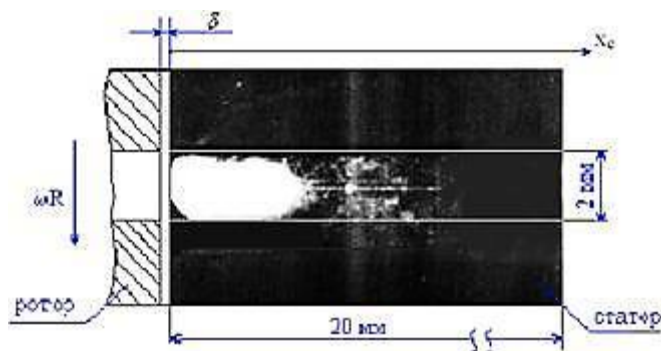


Рисунок 1.7 - Кавітаційний кластер, утворений в каналі статора роторного імпульсно-кавітаційного апарату

В процесі свого життєвого циклу кавітаційні бульбашки втрачають сферичну форму в залежності від максимального радіусу, частоти акустичного поля, в'язкості, наявності поверхнево-активних речовин тощо. Найбільші деформації спостерігаються на кінцевій стадії стискування. Особливо великий вплив має мусідство твердої стінки й близько розміщеної кавітаційної бульбашки. Це можна побачити на рисунку 1.8

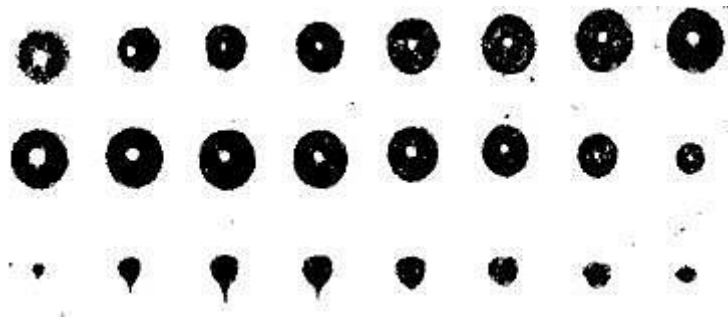


Рисунок 1.8 – Кінограма пуульсаці й кавітаційної бульбашки і утворення кумулятивного струменю в напрямі до твердої поверхні (максимальний радіус бульбашки)

Розрізняють чотири типи стискування, втрати стійкості та схлопування бульбашок в ультразвуковому полі поблизу твердої поверхні.

При першому типі схлопування кумулятивні струмені не спостерігаються.

При другому і третьому типах схлопування динамічний імпульс утворюється як результат дії хвиль тиску, що поширюються від прилеглої до поверхні частини бульбашки, так і дії кумулятивного струменя, що утворюється при злитті двох кільцевих струменів.

При четвертому типі схлопування динамічний вплив на тверду стінку надає хвиля тиску, що поширює від бульбашки, відокремленого від поверхні кільцевими струменями. При злитті цих струменів часто виникає кумулятивний струмінь від твердої поверхні крізь кавітаційний пухирець, що призводить до зниження динамічного імпульсу. Зі збільшенням в'язкості рідини кумулятивні цівки слабшають.

Крім кільцевих і радикальних кумулятивних стуй кавітаційні бульбашки утворюють ряд дрібних ниткоподібних "острівців" і "шорсткості", довжина яких збільшується в міру стиснення бульбашок. (14,19)

Для створення кавітаційної галузі використовується певна частина енергії первинного звукового поля. Відношення витраченої енергії до повної енергії первинного поля називається коефіцієнтом кавітаційного використання акустичної енергії

—

Енергія звукового поля, що йде на утворення кавітаційної області, витрачається протягом усієї фази розширення кавітаційної бульбашки. Цей час дещо менший за період первинного звуку  $T_0$ . Приймаючи цей час рівним  $T_0$ , середня за період, потужність, яка витрачається на освіту всієї кавітаційної області, дорівнює

— —

де  $N$  – потужність первинного звуку, Вт.



Рисунок 1.9 – утворення шорсткостей на поверхні кавітаційної бульбашки с кумулятивним струменем [14]

Таким чином, кавітаційна область є своєрідним трансформатором потужності, в якому порівняно повільно накопичувана енергія звільняється протягом дуже короткого часу, внаслідок чого миттєва потужність у багато

разів перевершує середню, що вводиться випромінювачем в кавітаційну область [23].

На розвиток та інтенсивність кавітації велика вплив надають зовнішні умови та властивості рідини. При кавітації в дегазованій рідині в кавітаційні бульбашки надходить менша кількість повітря, ніж у відбулася, що призводить до зменшення демпфуючого ефекту парогазової суміші в бульбашці при його змиканні та зростанні тиску в ударній хвилі. Дегазація рідини призводить до зменшення кавітації з одночасним збільшенням інтенсивності ударної хвилі, створюваної кавітаційними бульбашками [13]. При підвищенні температури тиск усередині бульбашки, певний тиск пари та газу, збільшується, і ударна хвиля послаблюється, але це також призводить до зростання кавітаційної області.

З теоретичних передумов випливає, що збільшення гідростатичного тиску призводить до зменшення часу захоплення бульбашки і збільшення інтенсивності ударних хвиль. Експерименти, проведені з дослідження кавітаційної ерозії, сонолюмінесценції та вимірювання амплітуди тиску в момент кавітаційної бульбашки, показують, що збільшення гідростатичного тиску призводить до помітного збільшення цих явищ, а потім деякого зменшення з вираженим оптимумом. Всі ці залежності отримали численне експериментальне підтвердження у різних дослідженнях [13].

Акустична кавітація в рідинах ініціює різні фізико-хімічні явища; сонолюмінесценцію (свічення рідин); хімічні ефекти (звукохімічні реакції); ерозію твердого тіла (руйнування поверхні); диспергування (подрібнення твердих частинок у рідині) та емульгування (змішування та гомогенізація рідин, що не змішуються).

Сонолюмінесценція та звукові хімічні реакції є генетично пов'язаними процесами, можуть взаємно впливати, але в принципі вони можуть здійснюватися незалежно один від одного [14,19].

Ультразвукова люмінесценція та свічення, що виникає при гідродинамічній кавітації, є близькими за своєю природою процесами. При

експериментальному дослідженні кавітації в низькочастотних звукових полях було виявлено аналогію з фізико-хімічних ефектів між низькочастотною та ультразвуковою кавітацією [14,19].

Модель фізико-хімічних процесів, що відбуваються в кавітаційному пухирці в прилеглому до нього об'ємі рідини, подають у наступному вигляді. У кавітаційну порожнину можуть проникати пари води розчинені гази, а так само речовини з високою пружністю пари і не можуть проникати іони або молекули нелетких розчинених речовин. Виділяється в процесі схлопывання бульбашки енергії достатньо для збудження, іонізації та дисоціації молекули води, газів та речовин з високою пружністю пари всередині кавітаційної порожнини. На цій стадії будь-який із присутніх газів є активним компонентом, беручи участь у передачі енергії збудження, перезарядки та інших процесах. Дія звукового поля на речовини, що проникають у порожнину, є безпосереднім, прямим, причому дія активних газів  $O_2$ ,  $H_2$  та  $N_2$  у кавітаційній порожнині подвійна:

- по-перше,  $O_2$  и  $H_2$  приймають участь в реакціях трансформування радикалів:

а  $N_2$  – в газових звукохімічних реакціях, кінцевим результатом яких являється фіксація азоту:

;

- по-друге, хімічні активні гази, проникаючи в кавітаційну порожнину, беруть участь, як і і благородні гази, передачі енергії електронного збудження молекулам води, соціальній та процесі перезарядки. Тут символом ))) позначено хімічну дію звуку.

При схлопуванні кавітаційного бульбашки в розчин переходять радикали  $H^\circ$ ,  $HO^\circ$  іони та електрони малої енергії, що утворилися в газовій фазі при розщепленні молекули  $H_2O$  і речовин з високою пружністю пари, продукти їх взаємодії та часткових рекомбінацій, а також метастабільні збуджені молекули  $H_2O..$

Сумарну схему кавітаційного розщеплення молекул води подають у такому вигляді:

Активні частинки, що виникають в системі після переходу в розчин, сольватуються і реагують з розчиненими речовинами. На цій стадії, коли здійснюються непрямі дії акустичних коливань, на хід процесу можуть впливати практично лише хімічно активні гази –  $O_2$  та  $H_2$ .

В кінцевому рахунку, вплив кавітації на водні розчини зводиться до єдиного процесу – розщеплення молекул води в кавітаційних бульбашках. Незалежно від природи розчинених речовин, звук діє на одну речовину – на воду, що призводить до зміни її фізико-хімічних властивостей: збільшенню рН, електропровідності води, збільшенню кількості вільних іонів та активних радикалів, структуризації та активації молекул.

Дослідження сонолюмінесценції, звукохімічних реакцій і численні гіпотези, що пояснюють ці явища, на даний момент дозволяють зробити тільки один висновок: природа первинної активації молекул всередині кавітаційного бульбашки є або теплової, або електричної.

Ерозія твердого тіла (руйнування поверхні) очищення поверхонь, видалення заусенеців і мікронерівностей, диспергування твердих частинок та емульгування здійснюються, в основному, двома характерними проявами кавітації: ударними хвилями та кумулятивними цівками, що утворюються при схлопуванні кавітаційних бульбашок.

На поверхнях частинок і твердих тіл є концентратори напруг у вигляді мікротріщин, нерівностей поверхні і т.п., на яких утворюються зародки кавітації. Під дією звукокапілярного ефекту та інтенсивних мікропотоків рідина проникає в пори та тріщини, де при захлопуванні кавітаційних бульбашок виникає потужна ударна хвиля, що сприяє руйнуванню матеріалів. Кумулятивні цівки руйнують поверхню твердого тіла за рахунок кінетичної енергії рідини. Дрібні годинники твердого тіла, розміри яких можна порівняти з поперечним перерізом кумулятивних струменів,



захоплюються ними і дають додатковий внесок у процес руйнування твердих частинок, що знаходяться в рідині.

Методи дослідження кавітації можна розділити на прямі та непрямі. До прямих методів відносяться:

- 1) візуальні – фото-, кіно- та відеозйомка кавітаційних утворень;
- 2) акустичні – вимірювання тиску в ударній хвилі, що випромінюється одним або сукупністю кавітаційних бульбашок при пульсаціях та схлопуванні.

Непрямі методи включають такі методи як:

- 1) фотоелектричний -реєстрація сонолюмінесценції при кавітації;
- 2) хімічні – дослідження зміни маси, концентрації чи обсягу хімічних реагентів з допомогою звукохімічних реакцій у кавітаційному полі;
- 3) гідродинамічні - зміна гідродинамічних параметрів потоку рідини, пов'язаних з інтенсивністю кавітації;
- 5) механічні - вимірювання величини кавітаційної ерозії, яку зазвичай виражають через спад ваги зразків у вигляді алюмінієвих циліндриків або через площу виривів в алюмінієвій фользі;
- 6) технологічні – зміни якісних показників оброблюваного середовища, пов'язаних з інтенсивністю кавітації (як оброблюване середовище використовують емульсії, суспензії тощо, у яких протікають гідромеханічні та тепломасообмінні процеси).

В якості беззмірних параметрів, що характеризують кавітацію, використовують:

індекс кавітації  $K$ ;

критерії гідродинамічної та акустичної кавітації [26, 27]:

---

де  $V$  – швидкість потоку рідини.

Використовується також комбінований та ефективний критерій кавітації:

---

---

У деяких випадках, внаслідок малості  $P_n$  и  $2\sigma/R_0$ , цими членами нехтують. Критерії  $x_a$  і  $x_r$  мають різні коефіцієнти кореляції з інтенсивністю кавітації, амплітудою імпульсу тиску, що характеризується, випромінюваного кавітаційною бульбашкою [26,27].

Індекс кавітації істотно залежить від величини виділеного розрахункового обсягу  $v$ . Критерії кавітації  $x$  та индекс кавітації  $K$  відображають різні кількісно-якісні параметри кавітації. Критерії кавітації  $x$  характеризують гідродинамічну та акустичну обстановку. У численних дослідженнях встановлено, що максимум величини ударного тиску, що генерується кавітаційною бульбашкою, спостерігається при  $0,2 \leq x_a \leq 0,3$ .

Індекс кавітації  $K$  характеризує поширення кавітаційних бульбашок у технологічному обсязі і є мірою просторової щільності енергії.

Для більш повного уявлення про фізичну картину кавітації слід характеризувати її величиною ударного тиску ( $P_{к1}$ ) та за величиною обсягу

кавітаційних утворень ( $\Delta v$ ). Відносні параметри типу  $\frac{P}{\rho c^2}$  та  $K$  також необхідні, так як вони характеризують ефективність випромінювача.

Найбільш перспективним є комбінований спосіб дослідження кавітації – фото- та відеозйомка, поєднані з вимірюванням акустичних та гідродинамічних параметрів кавітаційного поля. Цей спосіб добре зарекомендував себе в багатьох дослідженнях кавітації [27].

Енергія, яку потрібно використати для утворення кавітаційних бульбашок розраховується за формулою

–

Енергія тиску навколишнього середовища:

–  $E_T = \frac{4}{3}\pi r^3 P_n$ , де при утворенні бульбашки радіусом  $r = 1\text{мм}$  та при  $t=10^\circ\text{C}$  тиск насиченої пари дорівнює  $P_n=1,25 \cdot 10^3 \text{ Па}$  дорівнює  $E_T=4,189 \cdot 10^{-4} \text{ Дж}$ .

Таким чином енергія стискання бульбашки більше ніж у 20 разів перевищує енергію утворення бульбашки.

Визначення ефективності роботи теплогенератора через тепловиробництво розраховано за формулою

$$\eta = \frac{Q}{V_k \rho c^2}, \text{ де } Q \text{ — енергія, а } V_k \text{ в } \text{м}^3.$$

Об'єм кавітаційних бульбашок в робочій камері, тоді

\_\_\_\_\_

Більш узагальнені дані про кавітацію наведені в роботах професора Промтова М.А. свідчать про аналогічний до робіт професора Потапова Ю.С. Результат, який відображений в практичних порівняннях, а саме коефіцієнт ефективності тепловиробництва представлений у вигляді

---

де  $Q_v$  - тепло отримане на нагрів води, ккал;

$Q_{obl}$  – тепло на нагрів обладнання, ккал (пристрій + радіатори з обв'язкою) ккал;

$Q_{роз}$  – тепло, розсіяне навколо пристрою, ккал.

$N$  – витрачена енергія в кВт.

Коефіцієнт корисної дії теплогенератора

---

Фактичні результати, які отримані не тільки розробками кавітаційних пристроїв, свідчать про наявність достатньо значних очікуваних енергетичних резервів при розробці нового обладнання.

### 1.6 Динаміка обертального руху

В данній роботі найбільший інтерес викликає необхідність уяви обертального руху рідини котра присутня в запропонованому пристрої. На рисунку 2.1 ми можемо побачити рух рідин, що взаємодіють в автономній міні котельні.

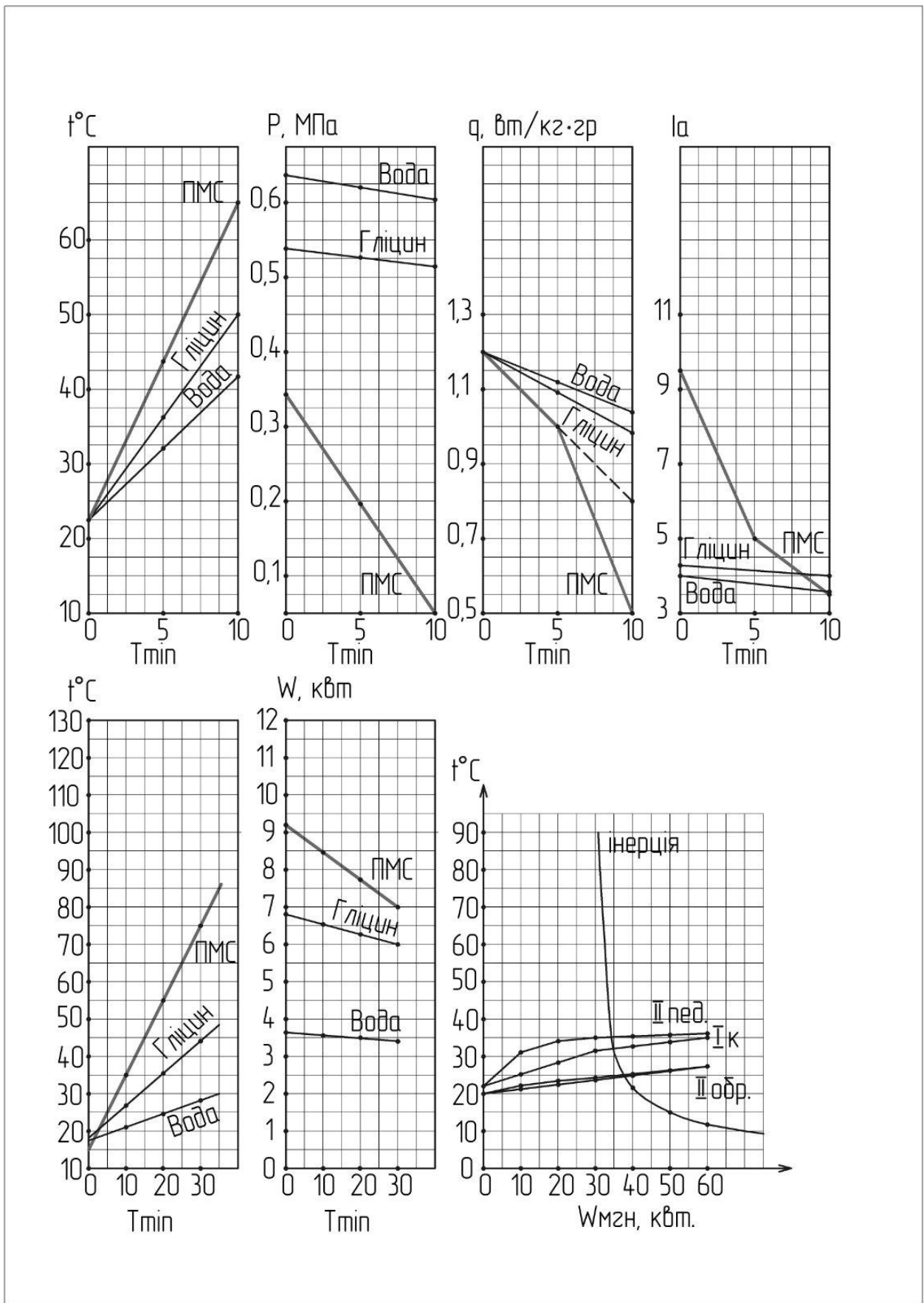


Рисунок 1.10 – Схема руху рідини, що взаємодіють в АМК.

Відомо, що момент інерції матеріальної точки рівний

Моментом інерції системи щодо осі обертання називається фізична величина, рівна сумі добутку мас  $m$  матеріальних точок системи на квадрати їх відстаней до розглянутої осі.

Момент інерції тіла у випадку безперервного розподілу маси рівний

-інтегрується по всьому об'єму.

1. Знайдемо момент інерції однорідного диска щодо осі, перпендикулярної до площини диска й проходячої через його центр. Розіб'ємо диск на кільцеві шари товщиною  $dr$ . Усі точки шару будуть перебувати на однаковій відстані від осі, рівному  $r$ . Об'єм такого шару рівний

## Площа кільця

—

—

2. Порожній тонкостінний циліндр радіуса  $R$  (обруч, велосипедне колесо й таке інше).

3. Суцільний циліндр або диск радіуса

—

4. Прямий тонкий довжиною  $l$  стрижень, вісь перпендикулярна стрижню й проходить через його середину.

—

5. Куля радіуса  $R$ , щодо осі, що проходить через його центр.

—

6. Момент інерції прямого стрижня довжиною  $l$ , вісь перпендикулярна стрижню й проходить через його кінець.

— — — — —

Наведені залежності обертального руху твердого тіла (в данному випадку елементи конструкції роторного-цівкового кавітатора дозволяють використовувати їх для подальшого розрахунку ефекту утворення кавітаційних бульбашок. Кожна із творених кавітаційних бульбашок уявляє собою мінімально можливий обсяг повітря з негативним тиском, котрий на трасі руху завдяки присутнім в загальній конструкції гвинтоподібних треків із спеціальними чарунками прямує з міста утворення, тобто чарунки, до механічного гальма, на якому відбувається схлопування кавітаційних бульбашок.

Для підвищення ефективності теплоутворення в данному проекті виконані розрахунки двох типів роторного-цівкового теплогенератора, в якому джерелом утворення кавітаційних бульбашок в першому є кільцеві рельєфні елементи, а в другому – лопасті з рельєфною поверхнею. Тобто в другому варіанті роторно-кавітаційний теплогенератор виконує функції лопатевого насосу і кавітатора одночасно.

### 1.7 Вихровий рух рідини

Засновником першого напрямку вважається М.Тесла, з його ідеєю отримання енергії з навколишнього простору [23]. Про його ідеї, зокрема запатентований ним трансформатор, двигун на постійних магнітах і т.інш. ведеться активна дискусія.

Засновником другого напрямку по праву вважається В.Шаубергер, з розробленою ним теорією енергії води [26]. Багато авторів пишуть про



безрезультатні спроби використати на практиці теорію В.Шаубергера, а також виготовити вихровий двигун.

Один із сайтів, присвячений питанням дослідження вихрової енергії, вибрав своїм епіграфом цитату «Енергія первинна – це причина, форма вторинна – це наслідок». Цим підкреслюється те, що людству поки не ясний основоположний принцип, який пояснює процеси, що протікають в вихрових апаратах.

Для пояснення механізму утворення додаткової енергії в апаратах, що реалізують вихровий рух рідини, розглянемо пристрій, схема якого наведена на рисунку 2.2 і назовемо його гідроциклон (ГЦ). Гідроциклон складається з корпусу 1 з конічним центральним каналом, в якому розташований конічний активатор, виконаний у вигляді шнека, гвинтовий канал якого звужується, та двох кришок - вхідної 3 та вихідної 4.

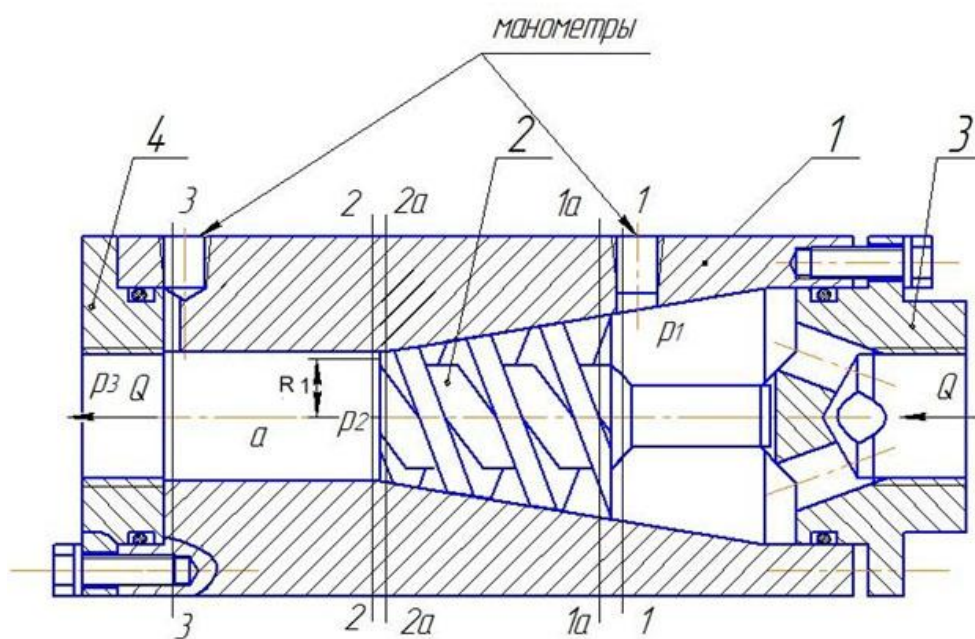


Рис. 1.  
1. Корпус. 2. Активатор. 3. Входная крышка.  
4. Выходная крышка.

Рисунок 1.11 – схема гідроциклону(ГЦ)

Припустимо, що крізь ГЦ проходить рідина з витратою  $Q$ . Розглянемо рівняння енергії для перерізів 2а -2а активатора, - на виході з гвинтового каналу що звужується і 2-2 - на вході в канал (а). Тиск в цих перетинах однаковий і дорівнює  $p_2$ . У перетині 2а -2а потік рухається по гвинтовому каналу плоскопаралельно, і енергія одиниці маси потоку  $W_{2a}$  визначається з виразу

$$W_{2a} = E_o + p_2 / \rho + Q^2 / (2f^2),$$

де  $E_o$  - внутрішня енергія одиниці маси потоку ,

$f$  - площа поперечного перерізу сужаючогося гвинтового каналу на виході з активатора ,

$\rho$  - щільність робочої рідини ,

$Q$  - витрата робочої рідини.

У перетині 2-2 потік одночасно рухається паралельно осі зі швидкістю  $Q/F_2$  (оскільки дотримується принцип нерозривності потоку) і обертається навколо осі з кутовою швидкістю  $\omega=Q/fR$  .

Енергія одиниці маси потоку визначається з виразу

$$W_{2-2} = E_1 + p_2 / \rho + \frac{Q^2}{2F_2^2} + \frac{Q^2}{2f^2 R^2},$$

де  $E_1$  - внутрішня енергія одиниці маси потоку в перетині 2-2 ,

$F_2$  - площа перерізу каналу (а) ,

$R$  - радіус гвинтового каналу на конусі активатора,

Енергія одиниці маси потоку, що виникла від дії відцентрових сил переносного вихрового руху. Оскільки приплив енергії з зовні відсутній  $W_{2a} = W_2$ ,

$$— \quad — \quad \quad — \quad — \quad —.$$

Зазначене рівняння враховує те, що частина гідравлічної енергії потоку ( $Q^2 / 2 f^2$ ) при вході в канал ( $a$ ) перейшла у внутрішню енергію (раптове розширення потоку, тобто відрив потоку від стінок)

Враховуючи те, що  $F_2 \gg f$ , тобто  $Q^2 / (2F_2^2) = 0$ , впливає

$$— \quad ,$$

тобто, частина внутрішньої енергії потоку переходить в гідравлічну енергію переносного руху, яка на виході з ГЦ переходить в потенційну енергію тиску.

### 1.8 Теплоізоляційні матеріали та вироби

До теплоізоляційних матеріалів відносяться будівельні матеріали та вироби, призначені для теплової ізоляції огорожувальних конструкцій будівель і споруд, технологічного обладнання та трубопроводів. Такі матеріали мають низьку теплопровідність (при температурі 25 °С коефіцієнт теплопровідності не більше 0,175 Вт /м) і щільність (не вище 500 кг/м<sup>3</sup>).

Основна технічна характеристика теплоізоляційних матеріалів — це теплопровідність, тобто здатність матеріалу передавати тепло. Для кількісного визначення цієї характеристики використовується коефіцієнт теплопровідності, який дорівнює кількості тепла, що проходить за одиницю через зразок матеріалу товщиною 1 м і площею 1 м<sup>2</sup> при різниці температур

на протилежних поверхнях  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Теплопровідність виражається в Вт /мк або Вт/(м $^{\circ}\text{C}$ ). При цьому величина теплопровідності теплоізоляційних матеріалів залежить від щільності матеріалу, виду, розміру, розташування тощо. Також сильний вплив на теплопровідність надає температура і вологість матеріалу.

Крім цього, важливими додатковими властивостями теплоізоляційних матеріалів є — міцність на стиск, водопоглинання, сорбційна вологість, морозостійкість, паропроникність та вогнестійкість.

Класифікуємо теплоізоляційні матеріали

Теплоізоляційні матеріали та вироби можна систематизувати за основними ознаками:

- *по виду вихідної сировини*: неорганічні (мінеральна і скляна вата, ніздрюваті бетони, матеріали на основі азбесту, керамічні та ін) і органічні (дерево-волокнисті плити, пінно-і поропласти, торф'яні плити та ін.) Також виготовляються комбіновані матеріали, з використанням органічних і неорганічних компонентів.

- *за структурою*: волокнисті (мінеральна, скляна вата, шерсть тощо), ніздрюваті (ніздрюваті бетони і полімери, пінно-і газокераміка та ін.) І зернисті або сипкі (керамічний і шлаковий гравій, пемзовий і шлаковий пісок та ін.

- *за формою*: пухкі (вата, перліт тощо), плоскі (плити, мати, тощо), фасонні (циліндри, полуцеліндри, сегменти тощо), шнурові (шнури з неорганічних волокон: азбестові, мінерального і скляного волокна ).

- *за займистістю (горючістю)*: вогнетривкі (керамзит, ніздрюваті бетони тощо), важкоспалимі (цементно-стружкові, ксилоліт) і спаленні (комірчасті пластмаси, торфопліти, очерети і пр.)

- *за змістом сполучної речовини*: що містять речовину (ніздрюваті бетони, фіброліт і т. д.) і не містять речовину (скловата, мінеральне волокно).

Будівельні і теплофізичні властивості

Маркування теплоізоляційних матеріалів пов'язують з їх щільністю. Тому основним показником якості таких матеріалів є їх марка щільності: D15-35-50-100-125-150-175-200-250-300-350-400-500-600.

Температуростійкість оцінюють граничною температурою застосування матеріалу. Вище цієї температури матеріал змінює свою структуру, втрачає механічну міцність і руйнується, а органічні матеріали можуть загорятися. Граничну температуру застосування встановлюють трохи нижче значення температуростійкості в цілях безпеки, і вказують у технічній характеристиці матеріалу.

*Теплоємність* має істотне значення в умовах частих тепломінів, так як в цих умовах необхідно враховувати теплоту, що поглинається (акумуляовану) теплоізоляційним шаром. Теплоємність неорганічних матеріалів коливається від 0,67 до 1 кД/кг<sup>°</sup>С. Зі збільшенням вологості матеріалу його теплоємність різко зростає, тому що для води при 4<sup>°</sup>С вона складає 4,2 кДж/кг<sup>°</sup>С. Збільшення теплоємності відзначається і при підвищенні температури.

*Вогнестійкість* характеризує горючість матеріалу, тобто його здатність займатися і горіти при впливі відкритого полум'я. Горючі матеріали можна застосувати тільки при здійсненні заходів щодо захисту від загоряння і можливості використання засобів пожежогасіння. Займистість визначається при впливі температури 800-850 ° С і витримці протягом 20 хв.

Далі наведено та більш детально розглянуто фізико-механічні властивості.

*Щільність* для жорстких матеріалів — відношення маси сухого матеріалу до його об'єму, а щільність волокнистого — це відношення маси сухого матеріалу до його об'єму, але при певних заданих навантаженнях;

*Міцність* при стисненні визначається при 10% деформації. Це величина напруги, що викликає зміну товщини виробу на 10%. Це величина напруги, що викликає зміну товщини виробу на 10%.

Міцність теплоізоляційних матеріалів внаслідок їх пористої будови відносно невелика. Межа міцності при стисненні зазвичай коливається від 0,2 до 2,5

МПа. Матеріали, у яких міцність вище 0,5 МПа, називають теплоізоляційно-конструктивними і використовують для несучих огорожувальних конструкцій. Для деяких видів теплоізоляційних матеріалів основною характеристикою є межа міцності при вигині (плити, шкаралупи, сегменти) або при розтягуванні (мати, азбестовий картон та ін.) У всіх випадках потрібно, щоб міцність теплоізоляційного матеріалу була достатньою для його транспортування, збереження, монтажу та роботи в конкретних експлуатаційних умовах.

*Стисливість* — здатність матеріалу змінювати товщину під дією заданого тиску. Матеріали по стисливості м'які М: деформація понад 30%. Напівжорсткі ПЖ — деформація 6-30 %, жорсткі — деформація не більше 6%. Стисливість характеризується відносною деформацією матеріалу при стисненні під дією питомої 0,002 МПа навантаження.

*Водопоглинання* значно погіршує теплоізоляційні властивості і знижує міцність та довговічність. Матеріали з закритими порами, наприклад, піноскло, мають низьке водопоглинання (менше 1%). Для зменшення водопоглинання, наприклад, при виготовленні мінераловатних виробів найчастіше вводять гідрофобні добавки, які дозволяють зменшити сорбційну вологість в процесі експлуатації.

*Газо- і паропроникність* враховують при застосуванні теплоізоляційного матеріалу в огорожувальних конструкціях. Теплоізоляція не повинна перешкоджати повітрообміну житлових приміщень з навколишнім середовищем через зовнішні стіни будинків. У разі підвищеної вологості виробничих приміщень теплоізоляцію захищають від зволоження за допомогою надійної гідроізоляції, укладається з «теплого» боку.

*Хімічну і біологічну стійкість* теплоізоляції підвищують, застосовуючи різні захисні покриття або обробляючи їх антисептиками. Високопориста будова теплоізоляційних матеріалів сприяє проникненню в них рідин, газів і парів, що знаходяться в навколишньому середовищі. Взаємодія їх з матеріалом може викликати його руйнування. Органічні матеріали або

матеріали, що містять у своєму складі органічні компоненти (єднальні речовини, крохмаль, клей тощо) або волокнисті наповнювачі (деревне волокно), повинні володіти біологічною стійкістю. При зволоженні таких матеріалів виникає небезпека руйнування їх грибками або мікроорганізмами. Тому при використанні теплоізоляційних матеріалів у місцях, які схильні до зволоження, в процесі експлуатації необхідно обробляти їх антисептиками.

При використанні теплоізоляційних матеріалів в огорожувальних конструкціях вони можуть зазнати впливу поперемінного заморожування і розморожування, що може привести до їх руйнування, і втрати в зв'язку з цим, теплозахисних властивостей. Головною умовою забезпечення працездатності таких конструкцій є захист теплоізоляційного матеріалу від зволоження, яке може відбутися за рахунок міграції вологи (від «теплого» до «холодному») і конденсації водяної пари, яка найбільш інтенсивно відбувається в холодну пору року.

## РОЗДІЛ 2. РОЗРАХУНОК АМК

### 2.1 Основні елементи пристрою АМК та описання його функцій.

В основу пропонуемого проекту закладений пілотний зразок двух-контурної системи, який складається з 1-го контуру, до складу якого водять три бойлери, два з котрих мають кавітатори і теплообмінники, а третій центральний має теплообмінник. Всі три бойлера розміщені в бак-акумуляторі 2-го контуру. Над бойлерами з кавітаторами на верхній площині баку акумулятора 2-го контур закріплені електродвигуни.

Двигуни АМК підключені відповідно схемі живляться від мережі 380 В через шкаф автоматичного управління, в якому знаходиться прилад плавного пуску, мікропроцесор автоматичного перемикання режиму експлуатації та електролічильник.

Для запобігання втрат тепла, бак-акумулятор 2-го контуру АМК має підвищену систему термоізоляції та при обов'язковому забезпеченні герметичності усіх вузлів 1-го контуру, що знаходяться в середині бака-акумулятора 2-го контуру.

Особливістю даної схеми є прокачування води у 2-му контурі виконується через теплообмінники, які розташовані у бойлерах: центральний теплообмінник приймає охолоджену воду після циркуляційного насоса, далі продавлює частково нагріту воду в теплообмінники двох бойлерів з кавітаторами і далі нагріта в них вода потрапляє безпосередньо в бак-акумулятор 2-го контуру.

Щоб слідкувати за належною роботою пристроїв, в системі АМК встановлені різні датчики та прилади контролю табору показників. Це є рівнемір, встановлений на корпусі теплообмінника. Він дозволяє спостерігати за рівнем теплоносіїв у корпусі теплообмінника.

Найбільша ефективність теплотворення на АМК може бути забезпечена обов'язковим виконанням чотирьох умов:



- мінімальним можливим зазором (0.3 – 0.5 мм) між виступами ротора та статора механічної частини кавітатора;

- виготовлення дисків з термостійких діелектричних матеріалів, обумовлено тим, що при сталому русі рідини або робочого тіла по рельєфним поверхням виконаним з діелектричних матеріалів утворюється значний електричний потенціал, який призводить до значного підвищення температури при схлопуванні кавітаційних бульбашок.

- формуванням робочих поверхонь дисків з чарунковим рельєфом типу «шкіра акули», чарунки якої характеризуються наявністю золотої пропорції (була визначена при аналізі розмірів – ширина, довжина, глибина);

- використанням в'язких високотемпературних нетоксичних хімічних інертних теплоносіїв, в даному випадку було використана поліметилсилоксанова суміш, яка не полімеризується при температурах до 300 °С (температура кипіння 317 °С).

На рисунку 2.1 розглянуто принципову схему автономної міні котельні.

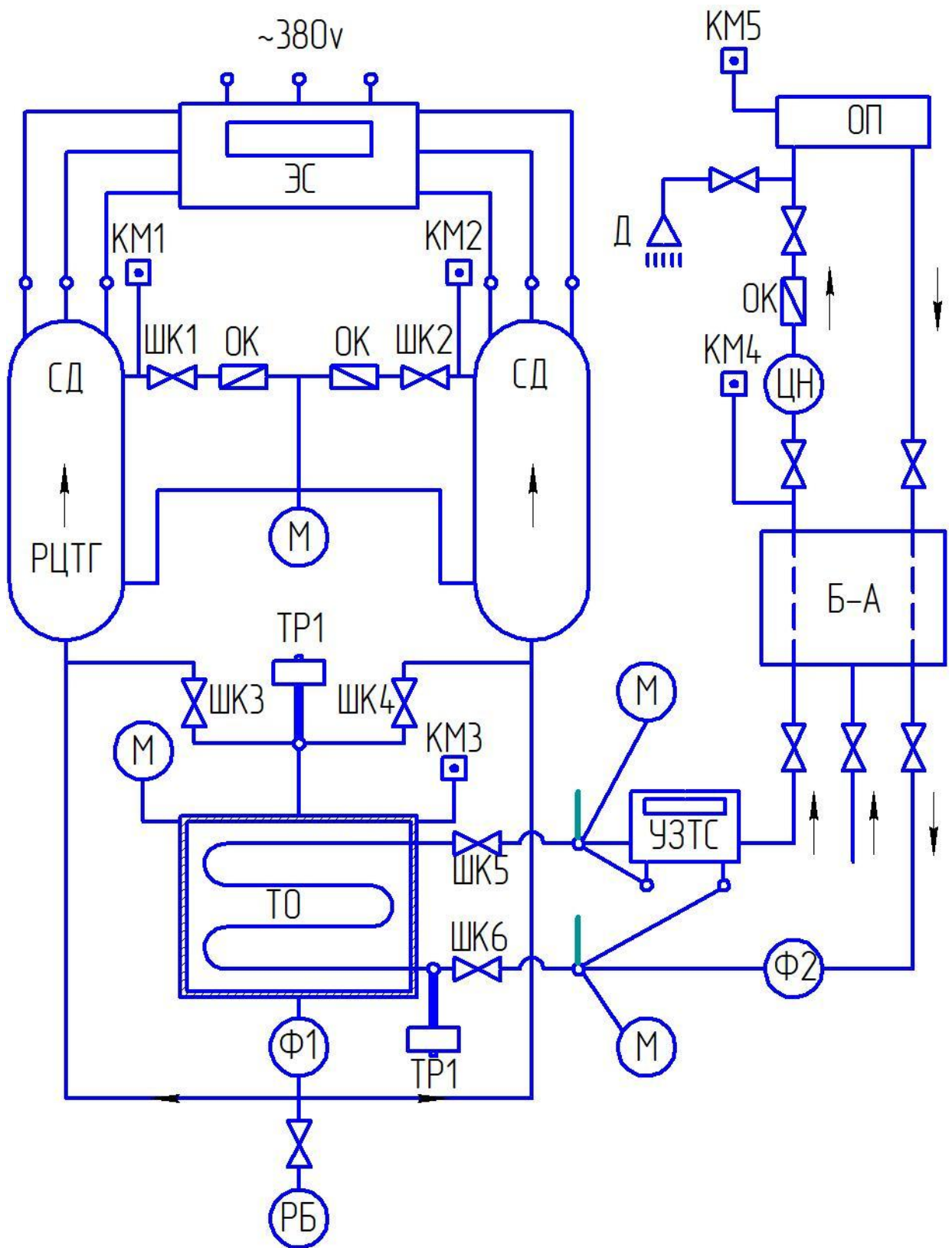


Рисунок 2.1 – Принципова схема автономної міні котельні «AMK-3E».

## 2.2 Гідравлічні розрахунки АМК

В гідравлічних розрахунках врахуємо всі робочі діаметри труб кавітаційної машини з показниками витрат при фланцевих з'єднаннях.

Витрати в першому контурі та другому контурах в залежності від типу рідини,

—

—

При умові, що витрата,

Витрати води в каналах між ребрами  $\text{мм}^2$

Визначення швидкості води при проходженні через штуцер

—

Загальна швидкість потоку в трубах діаметром 50 мм буде становити

*/ 1962,5=34 м/с*

## 2.3 Вибір електродвигунів

Для модуля АМК необхідно два трифазних електродвигуни потужністю 90кВт. Для цього згідно паспортним даним вибираємо найбільш економічні електродвигуни вітчизняного виробництва, які мають такі характеристики:

- потужність,  $P = 90\text{кВт}$
- частота,  $f = 2900 \text{ об./хв}$
- ККД = 91%

Такі параметри повністю задовільняють умовам обертання механізму кавітуючих деталей, та синхронізуються з ними через муфту.

При виборі насосу для циркуляції води з баків – акумуляторів до системи внутрішнього опалення учбового корпусу, ми враховуємо необхідну подачу та напір для необхідного навантаження.

## 2.4 Мікропроцесорна схема керування

Мікропроцесорна схема керування складена в основі контролеру BSR.

До складу онтролеру входять чотири модулі:

- 1) Модуль процесора;
- 2) Вхідний модуль;
- 3) Вихідний модуль;
- 4) Блок живлення.

Основні функції:

- плавний пуск двох контурів схеми.
- автоматичне керування та спостереження за датчиками рівню та температури;
- включення та відключення двох модулів електродвигунів та електронасосів;
- аварійне відключення від мережі при виходу з ладу обладнання;

Кожен блок АМК має пристрій плавного пуску, згідно з електричною схемою. Завдяки цьому у разі виникнення аварійної ситуації чи планових

експлуатаційних робіт, дає можливість відключити один із блоків АМК, та виконати роботи по відновлюванню устаткування.

На рисунку 2.2 зображена принципова схема роботи автономної міні котельні.

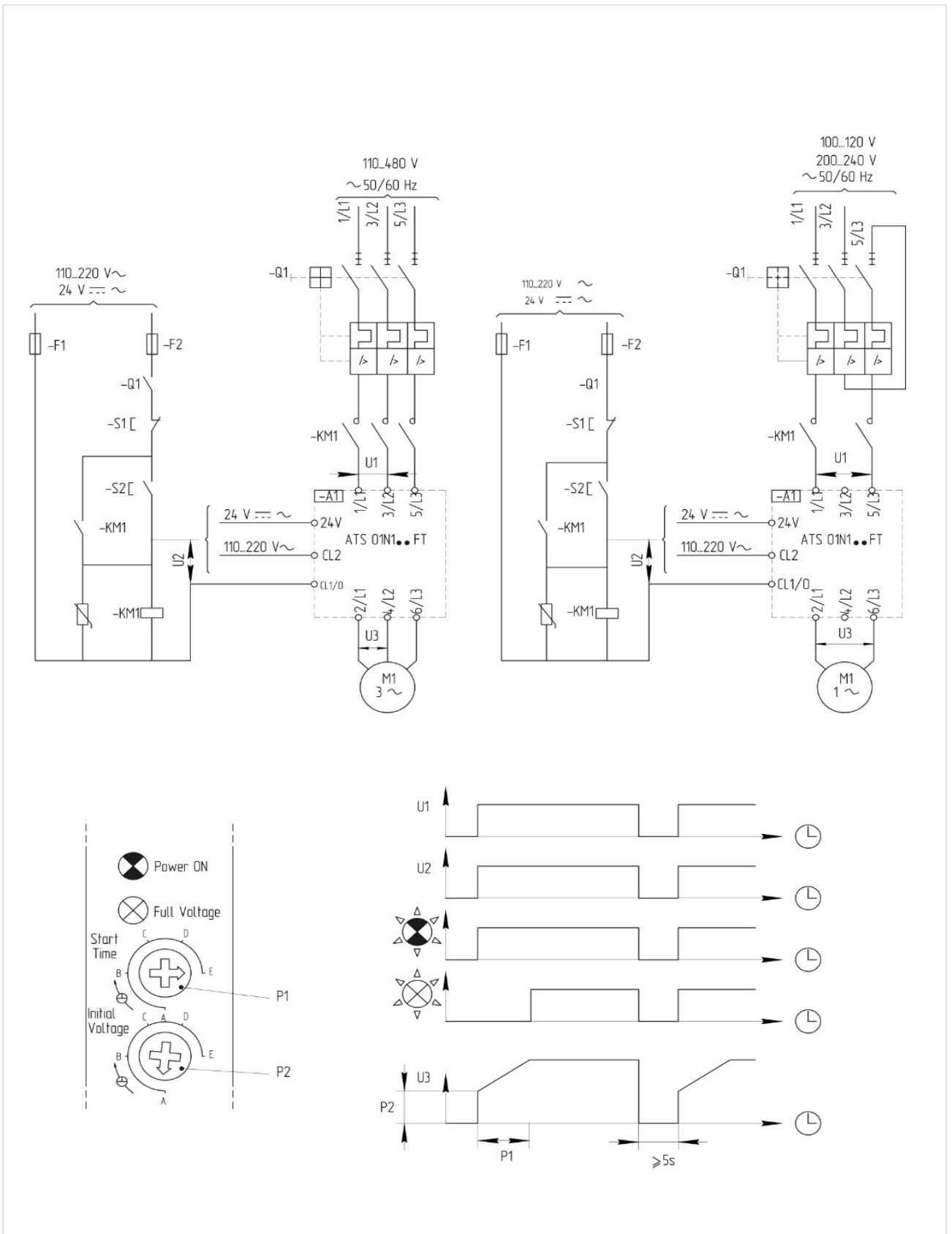


Рисунок 2.2 – Принципова схема роботи АМК

## 2.5 Економічні розрахунки АМК

На данному об'єкті, за розрахунками планується встановити два модулі автономних мінікотелен та два циркуляційних насоси до них. Також у проекті зазначен шкаф керування автоматикою.

Формула коефіцієнта економічної ефективності

—

Термін окупності визначаємо

—————

де  $t$  – період часу у місяцях,

$C_{ц.о}$  – економічна вартість центрального опалення,

$C_{амк}$  – економічна собівартість модулю АМК.

З урахування того, щоб здешевити загальну цифру витрат на обладнання, пропонуємо замінити більш дороге обладнання на вітчизняні електродвигуни. В таблиці 2.1 приведені економічні розрахунки собівартості та окупності в автономної міні котельні.

Таблиця 2.1 – Розрахункові економічні показники собівартості і окупності АМК

№	Стаття витрат	Одиниця вимір	1
1	Опалювальна площа	М2	9000
2	Встановлена потужність електродвигуна	кВт	2 x 45
3	Циркуляційні насоси та автоматика	тис. грн	122,483
4	Плавний пуск	тис. грн	25,088
5	Арматура, обв'язка	тис. грн	107,005
6	Монтаж, налагодження	тис. грн	139,104
7	Разом, початкові витрати на АМК	тис. грн	394,680
9	Витрати на центральне опалення	тис. грн/сезон	70,680
10	Витрати на центральне гаряче водопостачання	тис. грн/рік	28,980
11	Всього	тис. грн	74,400
12	Витрати на опалення за допомогою АМК	тис. грн/сезон	35,040
13	Витрати на нагрів води за допомогою АМК	грн/рік	35,520
14	Всього	тис. грн	70,560
15	Річна економія при використанні АМК	грн/рік	29,100
16	Окупність АМК (при денному тарифі)	місяців	66
17	Окупність АМК (при нічному тарифі)	місяців	45



В таблиці 2.2 зображені приблизні розрахунки енерговитрат при опаленні дому враховуючі усі показники.

I. Вихідні дані				
№ п\п	Показник	Символ	Одиниця виміру	К-ть
1	Маса води в II контурі	$m_{в}$	кг	8000
2	Маса теплоносія в I контурі	$m_{т}$	кг	200
3	Маса повітря в об'єкті ( $\rho=1,29\text{кг/м}^3$ )	$m_{в3}$	кг	5805
4	Маса металоконструкції (АМК+труби радіатора)	$m_{ме}$	кг	6000
5	Теплоємність води	$C_{в}$	ккал/(кг·К)	1000
6	Теплоємність теплоносія I го контуру	$C_{т}$	ккал/(кг·К)	0,380
7	Теплоємність повітря	$C_{в3}$	ккал/(кг·К)	0,241
8	Теплоємність сталі	$C_{ме}$	ккал/(кг·К)	0,116
9	Початкова температура	$t_{н}$	°С	10
10	Кінцева температура	$t_{к}$	°С	60
11	Інтервал стартового нагріву	$t_{е}$	°С	50
12	Інтервал нагріву при циклуванні	$\Delta t_{ц}$	°С	±5
13	Середньодобові теплові витрати	$\Delta t_{п}^1$	°С/год	3
14	Встановлена потужність електричного двигуна	$N_{у}$	кВт	2x45
15	Зменшення потреби електроенергії при +60 0С	$\Delta W$	%	30
16	Мінімальний коефіцієнт ефективності	$K_{е}$	-	3

Таблиця 3.2 -Орієнтований розрахунок енерговитрат при опаленні дому

Також були проведені розрахунки при початковому нагріві, враховуючі всі показники та затрати на нагрів, що наведено у таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – Розрахунок при початковому нагріві

II. Розрахунок при початковому нагріві					
№	Показник	Формула розрахунку	символ	Одиниця виміру	К-ть
1	Тепло нагріву води		$Q_{\text{с}}^{\text{II}}$	ккал/кВт	859,9
2	Тепло нагріву теплоносія		$Q_{\text{T}}^{\text{I}}$	ккал/кВт	859,7
3	Тепло нагріву металевої конструкції		$Q_{\text{ме}}$	ккал/кВт	859,8
4	Загальна кількість теплоти		$Q_{\text{o}}$	кВт	510,1
5	Час початку нагріву	_____	$\tau$	год	7,72
6	Час теплової компенсації	_____	$\tau_{\text{k}}$	год	3,58
7	Загальний час початку нагріву		$\tau_{\text{o}}$	год	11,3

Враховуючи обидва контури, в яких протікає рідина, необхідно було провести озрахунки нагріву при циклуванні, для отримання більш точних показників, що наведені у таблиці 2.4.

Таблиця 2.4 – Нагрів при циклуванні

III. Нагрів при циклуванні					
№	Нагрів при циклуванні	Формула розрахунку	Сим вол	Одиниця виміру	К-ть
1	Тепло циклу в I контурі		$Q_{\text{ц}}^{\text{I}}$	кВт	0,44
2	Тепло циклу в II контурі		$Q_{\text{ц}}^{\text{II}}$	кВт	46,51
3	Тепло циклу в металевій конструкції			кВт	4,05
4	Загальне тепло циклу		$Q_{\text{цвз}}$	кВт	55,9
5	Час роботі в циклі	_____	$\tau^{\text{ц}}$	час	0,254
6	Тепло нагріву повітря в циклі		$Q_{\text{оц}}$	кВт	4,9
7	Час роботи АМК в добу		$\tau_{\text{цц}}$	час	6,0
8	Витрати на електроенергію в місяць		$З_{\text{ээ}}$	грн/м	16904,2
9	Питомі витрати	$\tau_{\text{м}}=30\text{діб}$		Вт/м <sup>2</sup> · час	56

## ВИСНОВОК

В процесі дипломної роботи був проведений аналіз сучасних проблем опалення в житлово-комунальному господарстві та проаналізовані напрямки впровадження нетрадиційних та відновлювальних систем енергопостачання. Був розроблений проект пристрою для штучної кавітації з метою використання виникаючих кавітаційних ефектів для інтенсифікації фізико-хімічних процесів в різних галузях промисловості. В даному пристрої використовується два трифазних асинхронних електродвигунів потужністю по 45 кВт, диск ротору діаметром 550 мм. Була розроблена принципова електрична схема з релейним захистом та автоматикою.

В проекті закладений механізм отримання теплової енергії шляхом реалізації процесів, які відбуваються в пристрої (непосередственно в кавітаторі) процеси утворення кавітаційних бульбашок і їх наступні руйнуванні (схлопуванні) при якому виділяється тепла енергія. Реалізація механізму кавітації в рухомим потоком енергоносія забезпечується створенням кавітаційних бульбашок та їх наступного знищення.

Використовувані в даному проекті енергоносії, в тому числі поліметилсилоксанова суміш, що має температуру кипіння та робочу температуру 250°C не має токсичних відень та радіаційних наслідків. Ця маса у результаті кавітаційних взаємодій не підвергається поїтної полімерізації (необхідно приблизно 2-5% оновлення).

З урахуванням того, щоб здешивити загальну цифру витрат на обладнання, пропонується замінити дороге обладнання на вітчизняне. Для впровадження робочого проекту необхідно залучити модулі АМК та провести пуско-налагодні й монтажні роботи. Пропонуєма галузь застосування АМК: промислові об'єкти, сфера ЖКГ, охорона промисловості та сільське господарство.

## СПИСОК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Перник А.Д. Проблемы кавитации. – Л.: Судостроение, 1996. – 439с.  
Пирсол В.В. Кавитация. – М.: 1975. – 95с.
2. Рождественский В.В. Кавитация. – Л.: Судостроение, 1977. – 248с.
3. Левковский Ю.Л. Структура кавитационны течений. – Л.: Судостроеие, 1977. – 248с.
4. Young F.R. Cavitation. - New York: McGraw-Hill, 1989.
5. Leighton T.G. The acoustic bubble. – London: Academic, 1994.
6. Mahulkar A.V., Vapat P.S., Pandit A.B., Lewia F.M. Steam Bubble Cavitation. – AIChE Journal. 2008. Vol. 54, No.7-P. 1711-1724.
7. Suslick K.S.The chemical effects of ultrasound. – Scientific American. 1989. February. – P.80-86.
8. Кнэпп Р., Дейли Дж. Хэммит Ф. Кавитация. – М.: Мир, 1974. – 668 с.
9. Федоткин И.М., Немчин А.Ф. Использование кавитации в технологических процессах. – Киев: Вища шк., 1984. – 68с.
10. Флинн Г. Физика акустической кавитации в жидкостях. Физическая акустика. – Под ред. У. Мезона. – М.: Мир, 1967. – Т. 1, Ч.Б. – С.7-138.
11. Шутлитов В.А. Основы физики ультразвука: Учеб. Пособие. – Л.: Изд-во Ленинград. Ун-та, 1980. - 280с.
12. Сиротюк М.Г. Экспериментальные исследования ультразвуковой кавитации. Мощные ультразвуковые поля. Под. ред Л.Д. Розенберга. – М.: Наука, 1968. – 168-220 с.

13. Маргулис М. А. Основы звукохимии: учеб. пособие для спец. вузов . – М.: Высш.шк., 1984-272с.
14. Акуличев В.А. Пульсации кавитационных полостей Ультразвуковые поля. Под.ред. Л.Д. Розенберга. – М.: Наука, 1968. – 129-166с.
15. Neppiras E.A. Acoustic cavitation // Phys/ Repts. – 1980. V. 61, N 3. – P. 159- 251.
16. Акуличев В.А. Кавитация в криогенных и кипящих жидкостях. – М.: Наука, 1978. – 220 с.
17. Основы физики и техники ультразвука: Учеб. пособие для вузов/ Б.А. Агрант, М.Н. Дубровин, Н.Н. Хавский – М.: Высш. шк., 1987. – 352 с.
18. Маргулис М.А. Звукохимические реакции и сонолюминисценция. – М.: Химия, 1986. – 288 с.
19. Козырев С.П. Гидроабразивный износ металлов при кавитации. – М.: Машиностроение, 1971. – 240 с.
20. Немчин А.Ф. Новые технологические эффекты тепломассопереноса при использовании кавитации // Пром. теплотехника. – 1997.Т. 196 №6. – С.39-47.
21. Розенберг Л.Д. Кавитационная область // Мощные ультразвуковые поля / Под ред. Л.Д. Розенберга. – М.: Наука, 1968. – Ч.: – С.221 – 226.
22. Новицкий Б.Г. Применение акустических колебаний в химико-технологических процессах. – М.: Химия, 1983. – 192 с.
23. Бергман Л. Ультразвук и его применение в науке и технике. – М.: Иностр. лит., 1957. – 726 с.
24. Бронин Ф.А., Ченов А.П. Удаление заусенцев и диспергирование порошковых материалов при воздействии ультразвука. – М.: Машиностроение, 1978. – 55 с.

25. Юдаев В.Ф. Гидромеханические процессы в роторных аппаратах с модуляцией проходного сечения потока обрабатываемой среды // Теор. Основы хим. технол. – 1994. – Т. 28, № 6. – С. 581 - 590.
26. Промтов М.А. Пульсационные аппараты роторного типа: теория и практика. – М.: Машиностроение-1, 2001. – 260 с.
27. Кименов, Г. А. Техническая термодинамика / Г. А. Кименов. – Техника: София, 1981. – 374 с.
28. Рей, Д. Экономия энергии в промышленности. Пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 208 с.
29. Попов, А. В. Анализ эффективности различных типов тепловых насосов // Проблемы энергосбережения. – 2005. – № 1 – 2.
30. Потапов Ю.С. Энергия вращения. Электронная библиотека. 2005.- 543с.
31. Левенталь Г.Б., Попирін Л.С., Оптимизация теплоэнергетических установок. – М.: «Энергия», 1968. – 314с.
32. Дудишев В.Д. Способ преобразования энергии электрогидравлического удара // пат РФ 2157853.
33. Потапов Ю.С., Фоминський Л.П., Потапов С.Ю. Энергия вращения. Кишинев – 2001. – 400 с.
34. Зингер Н. М. Тепловые электростанции. Теплоснабжение. ВИНТИ, том 3. - М.: 1988. 76-98 с.
35. Юткін Л.О. Електрогідравлічний ефект. М.; Л.: «Машгіз», 1955. – 52 с.
36. Кнепп Р., Джеймс Дж., Хемм Ф. Кавітація. – М.: «Світ», 1975. – 750 с.
37. Кардашов Г.А. Фізичні методи інтенсифікації процесів хімічної технології. – М.: «Хімія», 1990. – 206с.
38. Перник А. Д. Проблеми кавітації. – Л.: «Суднобудування», 1996. – 439 с.

39. Абрамович Г. М. Прикладна газова динаміка. М.: «Наука», 1991. – Т.1 -597 с.

40. Белинский С. Я. и Липов Ю.М. Энергетически установки электростанций. Учебник для вузов. М.: «Энергия», 1974. – 304с.

41. Васильев, Г. П. Эффективность и перспектива использования тепловых насосов в городском хозяйстве Москвы // Энергосбережение. – 2007. – № 8. – с. 63 – 65.

42. Наздрашов, М.Н. Комплексный подход к вопросу отопления, вентиляции и горячего водоснабжения административных, культурно-бытовых и жилых зданий // Новости теплоснабжения. – 2000. – № 02. – с. 35 – 38.

43. Фролов, В. П. Эффективность использования тепловых насосов в централизованных системах теплоснабжения / Фролов В. П., Щербаков С.Н., Фролов М.В., Шелгинский А.Я. // Новости теплоснабжения. – 2004 – №7

44. Шилкин, Н. В. Использование тепловых насосов в системах горячего водоснабжения зданий // Сантехника. – 2003. – № 3. – с. 65 – 67

45. Снежкін, Ю.Ф. Використання теплових насосів у процесах сушіння / Снежкін, Ю.Ф., Чалаєв Д.М., Шаврін В.С., Хавін О.О., Дабіжа Н.О. // Пром. теплотехника. – 2006. – Т.28. – № 2. – с. 106 – 109