

УДК 621.1:502.174.3  
КП  
№ держреєстрації 0116U000922  
Інв. №

Міністерство освіти і науки України  
Сумський державний університет  
(СумДУ)  
40007, м.Суми, вул.Римського-Корсакова, 2  
тел. (0542) 33-44-94 факс (0542) 33-40-49  
e-mail: info@nis.sumdu.edu.ua

ЗАТВЕРДЖУЮ  
Проректор з наукової роботи,  
д-р.фіз.-мат. наук., професор  
\_\_\_\_\_ А.М. Чорноус  
26.12.17 М.П.

ЗВІТ  
ПРО НАУКОВО-ДОСЛІДНУ РОБОТУ

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ТА РЕСУРСОЗБЕРЕЖЕННЯ У  
ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСАХ ПЕРСПЕКТИВНИХ ГАЛУЗЕЙ  
ПРОМИСЛОВОСТІ ЗА РАХУНОК ВПРОВАДЖЕННЯ  
БАГАТОФУНКЦІОНАЛЬНИХ АГРЕГАТІВ**

(остаточний)

Начальник НДЧ  
канд. фіз.-мат. наук, с.н.с

\_\_\_\_\_

Д.І. Курбатов

Керівник НДР  
канд. техн. наук, п.н.с

\_\_\_\_\_

А.А. Папченко

2017

Рукопис закінчено 26 грудня 2017 р.  
Результати даної роботи розглянуті науковою радою СумДУ, протокол № 4  
від 28.12.2017 р.

**Список авторів**

Керівник НДР, пров.наук.співроб., канд. техн. наук	26.12.2017	А.А. Папченко (реферат, вступ, висновки, розділ 1.2)
Науковий співробітник	26.12.2017	С.Ф. Ковальов (розділ 2)
Науковий співробітник	26.12.2017	М.С. Овчаренко (підрозділ 3.2 )
Мол. наук. співробітник	26.12.2017	В.О. Панченко (підрозділ 3.1)
Мол. наук. співробітник	26.12.2017	М.В. Лобуренко (розділ 4)
Мол. наук. співробітник	26.12.2017	А.М. Медвідь (підрозділи 1.1)
Студент ГМ.м-71	26.12.2017	С.В. Кудін (підрозділ 1.2)
Студент ГМ-41	26.12.2017	А.С. Ворожка (підрозділ 1.3)
Студент ГМ-41	26.12.2017	А.В. Бакляк (підрозділ 1.4)
Студент ГМ-41	26.12.2017	О.С. Безсмертний (підрозділ 1.5)
Інженер I кат.	26.12.2017	Т.П. Копитіна (компоновка та редагування звіту)

## РЕФЕРАТ

Звіт про НДР: 51 с., 32 рис., 5 табл., 20 джерел.

### ТЕПЛОГЕНЕРУЮЧИЙ АГРЕГАТ, РОБОЧИЙ ПРОЦЕС, ГОМОГЕНІЗАЦІЯ, БАГАТОФУНКЦІОНАЛЬНЕ ПРИЗНАЧЕННЯ, ГІДРОМЛИН.

Мета роботи – модернізація технологічних процесу виробництва згущеного молока, теплогенерації в сфері ЖКГ за допомогою впровадження ТГА багатофункціонального призначення з метою ресурсо та енергозбереження, дослідження механізму реалізації окремих процесів та їх узгодження між собою.

Об'єкт дослідження – робочий процес теплогенеруючих агрегатів багатофункціонального призначення. Технічним об'єктом дослідження є гідросистеми з теплогенеруючими агрегатами в їхньому складі.

Спосіб проведення дослідження – розрахунковий та фізичний експерименти.

В даному звіті основна частина складається з чотирьох розділів. Звіт починається зі вступу, де наводиться загальна характеристика роботи по темі. В першому розділі наведені результати дослідження ТГА-гомогенізатора для виробництва згущеного молока. Наведено опис технологічної лінії, проведено аналіз аналогів ТГА та запропоновано модернізовану технологічну лінію. Представлено модель розрахунку параметрів ТГА та конструктивну схему агрегату. За результатами лабораторних та промислових випробувань обгрунтовано доцільність використання багатофункціонального обладнання для виробництва згущеного молока. В другому розділі викладені результати впровадження багатофункціонального ТГА у якості теплогенератора пілотної системи опалення. Доведено економічну доцільність використання агрегату в межах майстерень машинобудівного коледжу СумДУ.. Третій розділ містить в собі результати дослідження впливу конструктивних та режимних параметрів на насосну характеристику багатофункціонального ТГА.

Четвертий розділ містить результати роботи щодо дослідження впливу вихрових процесів на інтегральні гідродинамічні показники потоку рідини.

## ЗМІСТ

Перелік умовних позначень та скорочень.....	5
Вступ.....	6
1. Створення багатофункціонального теплогенеруючого агрегату для технології виробництва згущеного молока.....	8
1.1 Конструктивні аналоги та область застосування.....	8
1.2 Опис існуючої технологічної лінії.....	11
1.3 Вибір конструктивної схеми гомогенізатора та розрахунок енергетичних характеристик для виробництва згущеного молока.....	14
1.4 Конструктивна схема роторно-динамічного агрегата гомогенізатора.....	19
1.5 Технологічна лінія виготовлення згущеного молока з використанням роторно-динамічного агрегату гомогенізатора.....	22
1.6 Експериментальні показники агрегату гомогенізатора.....	24
1.7 Розрахунково-аналітичне обґрунтування ефективності використання агрегата-гомогенізатора.....	27
2. Використання багатофункціонального теплогенеруючого агрегату для систем опалення.....	29
2.1 Конструктивна схема пілотної системи опалення.....	30
3. Дослідження впливу конструктивних та режимних параметрів на насосну характеристику теплогенеруючого агрегату.....	35
3.1 Постановка задачі дослідження.....	35
3.2 Результати експериментального дослідження.....	38
4. Дослідження впливу вихрового руху на гідродинаміку потоку.....	40
4.1 Опис проведення розрахунку.....	41
4.2 Експериментальне дослідження вихрового руху.....	45
Висновки.....	48
Список джерел посилання.....	49

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ

### Умовні позначення

- $\mu$  - коефіцієнт динамічної в'язкості, Па·с;  
 $\nu$  - коефіцієнт кінематичної в'язкості, м<sup>2</sup>/с;  
 $\rho$  - густина рідини, кг/м<sup>3</sup>;  
 $D, R$  - діаметр, радіус робочого колеса, м;  
 $g$  - прискорення вільного падіння, м/с<sup>2</sup>;  
 $n_s$  - коефіцієнт швидкохідності;  
 $n$  – частота обертання, об/хв.;  
 $Q$  - подача (витрата) рідини, м<sup>3</sup>/с;  
 $H$  - напір, м;  
 $z$  - кількість лопатей в робочому колесі;  
 $\omega$  - кутова швидкість обертання, с<sup>-1</sup>;  
 $h$  - зазор між статорними та роторними елементами проточної частини, м;  
 $b$  - ширина пазу робочого колеса або статорного апарату4  
 $\eta$  - коефіцієнт корисної дії;  
 $h$  - втрати енергії, м;

### Скорочення

- ТГА – теплогенеруючий агрегат;  
 ПЧ – проточна частина;  
 ККД – коефіцієнт корисної дії;  
 РК – робоче колесо.

## ВСТУП

Існуюче сьогодні будується на умовах ринкової економіки, яка вимагає від будь-якого виробництва максимального здешевлення продукції без зниження її якості. У вказаному контексті найбільш пріоритетним напрямком є пошук шляхів по ресурсо- та енергозбереженню. Одним із шляхів цього напрямку є заміна існуючого обладнання на нове, що є менш енергоємним, а також пошук нових більш раціональних технологій виробництва.

Все це стало для існуючих підприємств поштовхом до вдосконалення своїх технологічних процесів та обладнання для їх реалізації. Одним із прикладів цього напрямку є вдосконалення ряду технологічних процесів і використання агрегатів багатофункціонального призначення. Вказані машини знайшли своє призначення в наступних галузях:

- приготування зернового замісу в умовах спиртових заводів (головне протиріччя існуючої технології полягає в попередній сушці зерна, його подрібненні та наступному змішуванні з водою) [1];
- приготування рідких кормів (соєва суспензія та молоко, рідкі зернові суміші) в умовах сільськогосподарських підприємств [2, 3];
- виробництво біологічно активних добавок, яке вимагає змішування хімічнореактивних компонентів з постійним контролем реакції, що відбувається [4, 5];
- виробництво мастил, змазок та змащувально-охолоджуючих рідин, яке передбачає протікання хімічної реакції при певному температурному режимі з одночасним інтенсивним перемішуванням компонентів;
- виробництво лакофарбових матеріалів, яке передбачає змішування ряду рідких компонентів з наступним додаванням пігменту та його подрібненням (найбільш складним етапом є подрібнення пігменту, яке реалізується бісерними млинами. Цей процес відбувається зі

значним зносом технологічного обладнання, що значно підвищує експлуатаційні витрати) [6];

- виробництво ряду харчових продуктів (молока, майонезу, кетчупів, паст, твердих сирів, маргарину, соків тощо). Вказані технології передбачають процес гомогенізації, який в значній мірі визначає якості отриманих продуктів та їх стійкість) [7, 8].

Перспективність використання багатофункціональних агрегатів для вищезазначених технологій визначено у [9].

У даному звіті наведено результати впровадження багатофункціональних агрегатів для технології виробництва згущеного молока та використання у якості теплогенератора для систем опалення та гарячого водопостачання. Для подальшого застосування багатофункціональних агрегатів в енергетиці є доцільним ґрунтовне дослідження вихрових процесів та їх вплив на гідродинаміку потоків.

# 1. СТВОРЕННЯ БАГАТОФУНКЦІОНАЛЬНОГО ТЕПЛОГЕНЕРУЮЧОГО АГРЕГАТУ ДЛЯ ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОБНИЦТВА ЗГУЩЕНОГО МОЛОКА

## 1.1 Конструктивні аналоги та область застосування

Підвищення ефективності роботи обладнання для проведення технологічних процесів харчової промисловості є однією з пріоритетних задач для народного господарства країни. В даний час через підвищення цін на енергоносії, особливо гостро постало завдання створення технологічного обладнання з низькими питомими енерговитратами на проведення різних технологічних процесів і одночасним підвищенням якості виробленої продукції. До такого устаткування в повній мірі можна віднести багатофункціональні теплогенеруючі агрегати (ТГА).

Багатофункціональні теплогенеруючі агрегати – машини вихрового принципу дії, в проточній частині яких відбуваються процеси подрібнення твердих включень робочого середовища, його активне перемішування, перекачування та гідродинамічний розігрів. З огляду на функціональне призначення ТГА існує можливість підсилення певного процесу (подрібнення, перемішування, нагрів) за рахунок внесення змін в його конструкцію. Класифікація теплогенеруючих агрегатів за функціональними ознаками представлена на рис. 1.

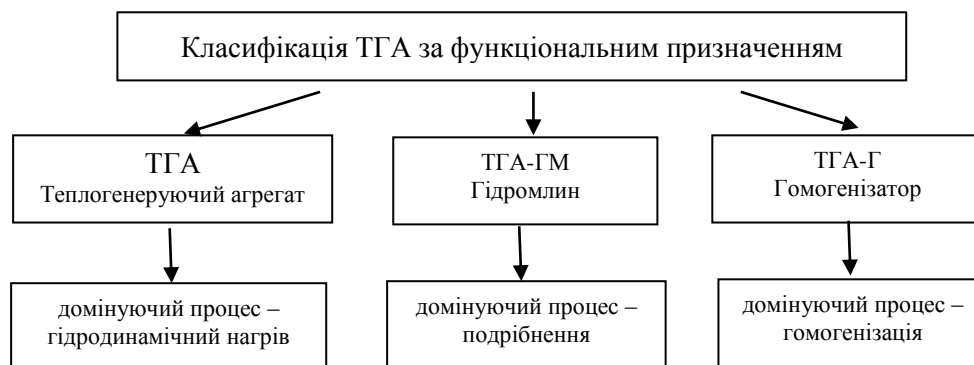


Рисунок 1 – Класифікація ТГА за функціональним призначенням

До аналогів багатофункціональних ТГА можна віднести: гідродинамічні сирени (ГДС), роторні апарати з модуляцією потоку (РАМП), роторно-пульсаційні апарати (РПА), гідродинамічні апарати роторного типу (ГАРТ), роторно-статорні апарати, пульсаційні апарати роторного типу (ПАРТ), гідромеханічні диспергатори



(ГМД) та ін. Конструктивна схема цих апаратів доволі близька. Апарати містять основні деталі – ротор і статор з каналами в їх бічних стінках. Оброблюване середовище проходить через канали, які періодично перекриваються, і виводиться з апарату. В результаті, в апараті на середовище впливають різні чинники: турбулентні пульсації, механічний вплив елементів конструкції, зсувні напруги, що виникають у зазорах між ротором і статором, інтенсивна акустична імпульсна і гідродинамічна кавітація, гідравлічні удари і т.д. Перераховані фактори фізичного впливу на оброблюване середовище інтенсифікують технологічні процеси особливо у системах "рідина-рідина" (Р-Р) і "тверде-рідина" (Т-Р).

Основна відмінність між багатофункціональним ТГА-гомогенізатором та його аналогами є те що роторні та статорні елементи мають різну кількість каналів та їх різний кут нахилу, що призводить до того, що незалежно від кутового положення робочих елементів відсутня можливість відкриття каналу та відповідно прохід через нього робочого середовища. Основний вплив на робоче середовище відбувається перш за все за рахунок високої турбулізації потоку в радіальних щілинах проточної частини. Принцип дії більшості аналогів полягає в різкому підвищенні тиску в проточній частині при закриванні каналів та його зниженні до кавітаційного рівня при їх відкриванні (статорні та роторні елементи в наведених аналогах як правило мають однакову кількість каналів). Ця незначна відмінність дуже сильно змінює робочий процес агрегату. В апаратах з зазорами близько 0,03 ... 0,1 мм основний вплив здійснюють різні типи кавітації. У пристроях, де зазори мають великі величини, аж до декількох міліметрів, інтенсифікація процесів відбувається в зазорі за рахунок зсувних зусиль.

Для створення конструкції машини, яка відповідала б пред'явленим до неї вимогам, проведено аналіз деяких існуючих машин, конструкцій, а також ідей тим або іншим чином пересічених із завданнями, поставленими перед гомогенізатором, що розробляється.

Розглянемо блендер для сипучих і рідких середовищ рис.2.

Основу блендера становлять вертикально змонтовані корпус і робоче колесо відцентрового насоса. На всмоктуванні використовується патрубок з подвійним

підводом, що дозволяє подавати рідкі та сухі середовища роздільно, таким чином запобігаючи формування грудок до їх надходження в корпус.



Рисунок 2. – Блендер

Продукти на великій швидкості вводяться у змішувачу камеру, створюючи при цьому вакуум в центрі колеса, що в свою чергу призводить до всмоктування продукту. Подача сухого продукту регулюється краном, встановленим в нижній частині приймального бункера.

Вказана конструктивна схема використовується для змішування сипучих та рідких компонентів. Основним недоліком вказаного обладнання є низький рівень гомогенізації, підвищений рівень вібрації при додаванні сипучих компонентів, що негативно позначається на ресурсі обладнання.

Найбільше розповсюдження на сьогоднішній день набули плунжерні гомогенізатори рис.3



Рисунок 3 – Плунжерний гомогенізатор

Його принцип роботи наступний. Гомогенізатор складається з плунжерного насоса високого тиску та регульованого голчатого сопла, за допомогою якого визначається рівень дроселювання тиску. Гомогенізація відбувається наступним чином. Насос нагнітає продукт, соплом

створюється дуже маленький зазор, і під час проходження продукту через цей зазор, відбувається розрив часток, і таким чином відбувається гомогенізація.

Переваги цього методу є простота регулювання, в залежності від середовища.

Недоліками плунжерних гомогенізаторів є висока матеріалоемність та енергоемність, неможливість регулювання витрати робочого середовища.

### 1.2 Опис існуючої технологічної лінії



Рисунок 4 – Технологія виробництва згущеного молока

В якості основної задачі дослідження було вдосконалення та модернізація технологічної лінії для виробництва згущеного молока.

У процесі роботи, з точки зору енергозатрат та поліпшення якості отриманої продукції, найбільш доцільно під час випарювання і приготування суміші, постійно пропускати масу через гомогенізатор, що дозволяє досягнути більш тонкої гомогенізації і однорідності продукту.

Ця задача вирішувалась в рамках акціонерного товариства

«Комаровський молочний завод», м.Харків.

Дана технологічна лінія являє собою накопичувальну ємність з'єднану трубою з блендером для сухих та рідких середовищ. Паралельно блендеру встановлений шестеренний насос для циркуляції робочого середовища під час протікання технологічного циклу та для фасовки готової продукції. Для реалізації постійного перемішування продукту в ємності, передбачена лопатева мішалка.

Основним недоліком наведеної технологічної схеми є низька якість кінцевого продукту через наявність в ньому частково розчинених компонентів (цукор, стабілізатори тощо). Крім того, слід відзначити, що при внесенні компонентів через

блендер відбувається його нестабільна робота (перенавантаження, вібрація, шум). Це призводить до низького терміну його роботи. Крім того, конструкція вузла ущільнення не дозволяє тривалій роботи на в'язких та гарячих робочих середовищах. Таким чином, робота блендера забезпечується тільки під час вводу компонентів до робочого середовища.



Рисунок 5 – Фото технологічної лінії виробництва згущеного молока

Виходячи з розгляду технологічного процесу та обладнання, що для нього використовується, зробити наступні висновки:

- підвищення якості готового продукту можна досягнути за рахунок впровадження вискоєфективного роторно-динамічного агрегата-гомогенізатора;
- агрегат повинен забезпечувати певний насосний ефект з метою прокачування продукту в технологічній лінії. Це дозволить використовувати шестеренний насос лише на етапі фасовки готового продукту;
- бажано, щоб при виборі потужності агрегата-гомогенізатора враховувалася можливість підігріву робочого середовища за рахунок гідро-динамічних сил, що дозволить частково відмовитися від ТЕНів та знизити вірогідність пригорання продукту.

Відмінність робочого процесу роторно-динамічного агрегата від конструктивних аналогів, таких як роторно-пульсаційні апарати, не дозволяють на пряму використовувати методики розрахунку енергетичних характеристик.

При створення роторно-динамічного агрегата гомогенізатора для реалізації процесу гомогенізації згущеного молока були поставлені наступні задачі:

Визначення можливості використання методик для розрахунку роторно-пульсаційних апаратів для прогнозування енергетичних характеристик роторно-динамічних агрегатів гомогенізаторів;

Створення дослідно-промислового зразка роторно-динамічного агрегату гомогенізатора.

Експериментальне дослідження характеристики роторно-динамічного агрегата гомогенізатора в плані забезпечення насосного ефекту і необхідного рівня гомогенізації.

Розруханкове моделювання структури течії рідини в проточній частині агрегата рохрахунково-аналітичним методом.

Дослідно-промислове випробування роторно-динамічного агрегату безпосередньо на базі Комаровського молочного заводу.

Об'єкт дослідження – робочий процес багатофункціонально ТГА-гомогенізатора.

Предмет дослідження – робота багатофункціональноТГА-гомогенізатора гідро-динамічного принципу роботи на однофазних та багатофазних робочих середовищах.

У якості технічного об'єкту, що досліджувався, була обрана наступна конструктивна схема рис.б.

Основними елементами цієї конструктивної схеми є передній статор 1, відвід 2, робоче колесо 3, задній статор 4.

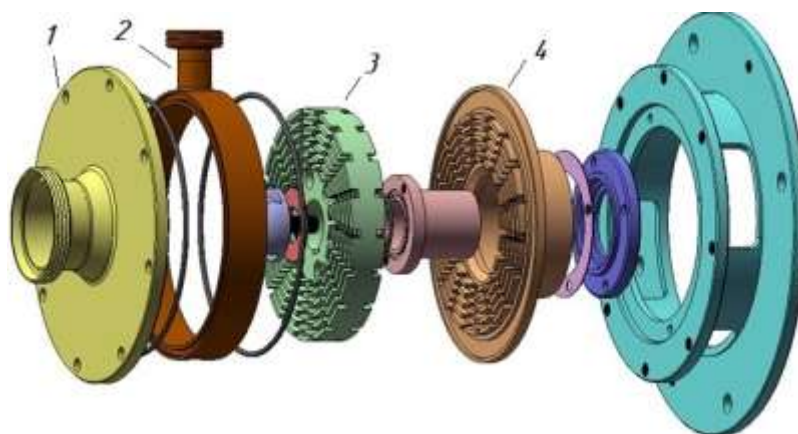


Рисунок 6 – Проточна частина багатofункціонально ТГА-гомогенізатора

Основна відмінність від роторно-пульсаційних апаратів полягає в тому, що на робочому колесі пази виконані під кутом  $20-25^\circ$ , що виключає повне відкриття каналів і відповідно наскрізний прохід рідини через ці канали.

Задачі вирішувалися за допомогою наступних методів:

- аналітичний розрахунок за допомогою класичних методів теорії турбомашин;
- експериментальне моделювання робочого процесу на експериментальному стенді;
- розрахункове моделювання структури робочого процесу даної машини за допомогою програмного комплексу.

### *1.3 Вибір конструктивної схеми гомогенізатора та розрахунок енергетичних характеристик для виробництва згущеного молока*

Проведемо розрахунок потужності, що споживається гомогенізатором.

Враховуючи певну подібність агрегата-гомогенізатора та роторно-пульсаційного агрегата, для попереднього розрахунку параметрів використовуємо наступну аналітичну модель.

Для визначення потужності, яку споживає даний роторний агрегат, скористаємось [10] й беручи до уваги матеріали [11], [12] та [13]. Пояснюючи вибір

найбільш відповідної математичної моделі розрахунку енергетичних характеристик, слід звернути увагу на принципову новизну розроблюваного гомогенізатора і, тому виходячи з пошуку машин, найбільш схожих до даної конструкції, які в значній мірі уже є дослідженими, наш вибір був зупинений на апаратах роторно-пульсаційного типу, які широко застосовуються для інтенсифікації гідромеханічних та масообмінних процесів, зокрема, у хімічних технологіях.

Згідно [10] споживана потужність агрегату визначається за формулою

$$N = k_N \rho l n^3 d^4,$$

де  $k_N$  – критерій потужності, що залежить від конструктивних параметрів машини, витрати та фізико-хімічних властивостей середовища;

$\rho$  – густина середовища, кг/м<sup>3</sup>. Приймаємо для води  $\rho = 998,2$  кг/м<sup>3</sup>;

$l$  – лінійний розмір, що характеризує геометрію потоку, м. В нашому випадку це довжина зубу  $l = 10$  мм =  $10 \cdot 10^{-3}$  м;

$n$  – частота обертання ротора, об/с.  $n = 50$  об/с;

$d$  – зовнішній діаметр ротора, м.

Значення  $k_N$  розраховуємо за формулою:

$$k_N = 37,5 Re_{\psi}^{-0,3} \left[ \left( \frac{b_p z_p}{d} \right)^{0,7} + \left( \frac{b_c z_c}{d} \right)^{0,7} \right] \cdot \left( 1 + 7,2 \cdot \frac{Q}{\pi d b_c z_c l_c} \right) \cdot \left( \frac{h}{d} \right)^{0,2},$$

$Re_{\psi}$  – відцентровий критерій Рейнольда;

$b_p$  – ширина прорізів ротора, м;

$b_c$  – ширина прорізів статора, м;

$z_p$  – кількість прорізів ротора;

$z_c$  – кількість прорізів статора;

$l_c$  – висота прорізи статора, м. В нашому випадку  $l_c = 1 = 10 \cdot 10^{-3}$  м;

$Q$  – витрата гомогенізатора, м<sup>3</sup>/с.  $Q = 10$  м<sup>3</sup>/год =  $2,778 \cdot 10^{-3}$  м<sup>3</sup>/с;

$h$  – величина зазору між зубцями статора і ротора, м. В даній конструкції величина стала  $h = 3 \cdot 10^{-4}$  м.

У свою чергу відцентровий критерій Рейнольда  $Re_{ц}$  отримаємо наступним чином:

$$Re_{ц} = \frac{\rho n d^2}{\mu},$$

де  $\mu$  – динамічна в'язкість середовища, Па·с. Використовуємо значення динамічної в'язкості для води  $\mu = 1,008 \cdot 10^{-3}$  Па·с.

Слід зазначити, що наша машина розглядається як багатоступенева і для кожної ступені буде проведений окремий розрахунок відповідно до вищенаведених формул. Після чого проведемо складання отриманих значень потужностей на кожній ступені  $N = \sum_{i=1}^m N_i$ ,

де  $N_i$  – потужність  $i$ -ї ступені, що розрахована згідно до формули, Вт;

$m$  - кількість ступенів гомогенізатора,  $m = 10$ .

Виходячи з того, що пропонована конструкція гомогенізатора є двохпоточною, то отримане значення сумарної потужності треба збільшити у два рази  $N_{г} = 2 \cdot N$ .

Підставляючи формулу отримаємо дійсне значення споживаної потужності гомогенізатора  $N = 2 \cdot \sum_{i=1}^m N_i$ .

Тільки після цього проведений розрахунок буде мати рацію і в значній мірі відповідатиме дійсності, яку звичайно треба у подальшому перевірити дослідним шляхом, який і буде виступати критерієм використаного методу розрахунку споживаної гомогенізатором потужності.

Для прикладу проведемо розрахунок потужності для однієї ступені агрегату, за алгоритмом якого, використовуючи програмний комплекс Excel, визначимо необхідні числові значення інших ступеней. Сталі розрахунку наведемо в таблиці 1.1. Отримані результати розрахунку зведемо до таблиці 1.2, де покажемо значення змінних величин характерних для кожної ступені та результати підрахунків за формулою не тільки потужності  $N_i$  але і проміжних величин: критерій потужності  $k_N$ , формула та відцентровий критерій Рейнольда  $Re_{ц}$ , формула. Скориставшись формулою визначимо дійсну споживану потужність гомогенізатора, числове значення якої відобразимо в останній графі таблиці 1.2.

Відцентровий критерій Рейнольда  $Re_{ц}$  для 1-ї ступені дорівнює



$$Re_{ц} = \frac{998,2 \cdot 50 \cdot 0,1095^2}{1,008 \cdot 10^{-3}} = 593683,9.$$

Критерій потужності для 1-ї ступені становить

$$k_N = 37,5 \cdot 593683,9^{-0,3} \left[ \left( \frac{0,005 \cdot 18}{0,1095} \right)^{0,7} + \left( \frac{0,005 \cdot 24}{0,1095} \right)^{0,7} \right] \cdot \left( 1 + 7,2 \cdot \frac{0,002778}{3,14 \cdot 0,1095 \cdot 0,005 \cdot 24 \cdot 0,01} \right) \left( \frac{0,0003}{0,1095} \right)^{0,2} = 3,15.$$

Використовуючи формулу, визначаємо споживану потужність агрегату на 1-й ступені  $N = 3,15 \cdot 998,2 \cdot 0,01 \cdot 50^3 \cdot 0,1095^4 = 570$  (Вт).

Таблиця 1.1 – Сталі величини при розрахунку потужності гомогенізатора

Густина $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Частота обертання n, об/с.	Динамічна в'язкість $\mu$ , Пас	Лінійний розмір l, м	Висота прорізи статора l <sub>c</sub> , м	Величина зазору h, м	Витрата Q, м <sup>3</sup> /с
998,2	50	0,001008	0,01	0,01	0,0003	0,00278

Згідно [23] вибираємо електродвигун трьохфазний, короткозамкнутий серії 4А, закритий, що обдувається: марка виробу 4А1602У3 з параметрами: N = 22,0 кВт - потужність двигуна; n = 3000 об/хв - синхронна частота обертів.

Таблиця 1.2 – Розрахунок потужності гомогенізатора

Параметри ступені	Ступені									
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X
Зовнішній діаметр ротора $d$ , м	0,1095	0,12	0,1295	0,14	0,1495	0,16	0,1695	0,18	0,1895	0,2
Ширина прорізів ротора $b_p$ , м	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005
Ширина прорізів статора $b_c$ , м	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005
Кількість прорізів ротора $z_p$	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18
Кількість прорізів статора $z_c$	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24
Відцентровий критерій Рейнольда $Re_{ц} \cdot 10^{-6}$	0,59	0,71	0,83	0,97	1,11	1,27	1,42	1,60	1,78	1,98
Критерій потужності $k_N$	3,15	2,53	2,1	1,73	1,47	1,25	1,08	0,98	0,82	0,71
Потужність $i$ -ї ступені $N_i$ , Вт	570	650	736	830	915	1016	1111	1218	1318	1432
Потужність гомогенізатора $N$ , Вт	19611									

#### 1.4 Конструктивна схема роторно-динамічного агрегата гомогенізатора

Конструктивні схеми робочого колеса і статора наведені на рис. 7



Рисунок 7 – Робоче колесо та статорні апарати гомогенізатора

В основі гомогенізатора, що розробляється, лежить аналог впровадженого у технологію виробництва етилового спирту багатofункціонального теплогенеруючого агрегату (ТГА) – машини, що реалізує ряд функцій, які дозволяють забезпечити виконання декількох стадій технологічного процесу, а саме: подрібнення, перемішування, підігрів та перекачування. Конструкція машини (рис.8) має деякі зміни у порівнянні з попередніми аналогами [14], суть яких полягає у появі додаткової ступені.

При розробці даного гомогенізатора нас зацікавила друга ступень описаного вище ТГА, а наявність додаткової ступені з робочими дисками не обов'язкова, тому що планується проведення гомогенізації малодисперсних частинок. Гомогенізатор складається з приводного асинхронного електродвигуна 1 (рис. 9), до якого кріпиться проточна частина, виконана з нержавіючої сталі.

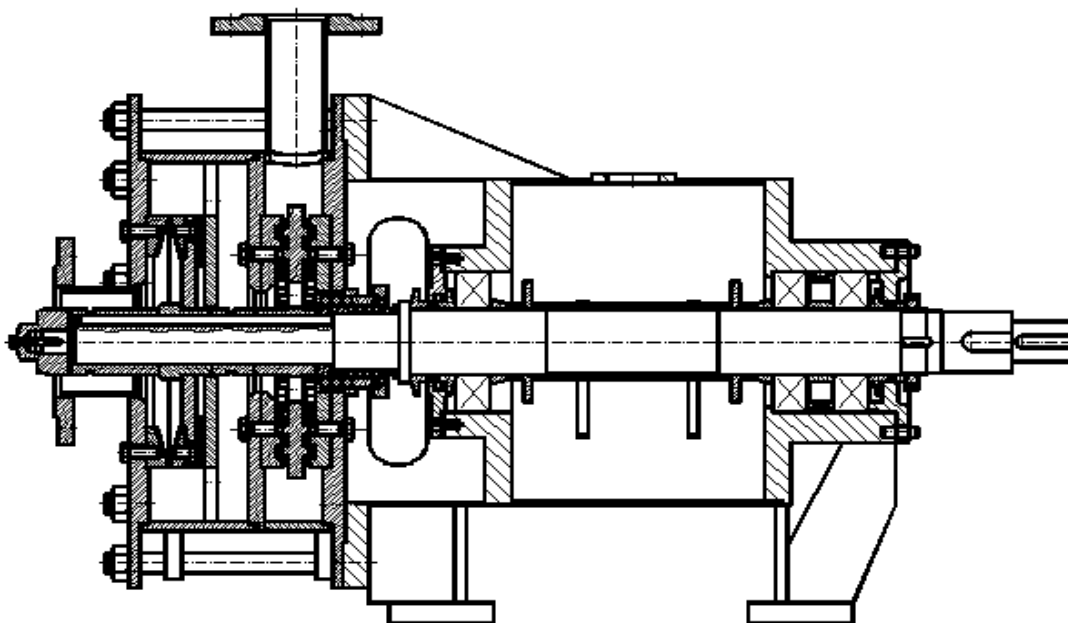


Рисунок 8 – Загальний вигляд ТГА

Вона складається з робочого колеса двохстороннього входу 2 із радіальними концентричними кільцями, яке кріпиться безпосередньо на валу двигуна (моноблочна схема) і обертається між статорними кільцями відповідно переднього 3 і заднього 6 дисками. Така конструкція робочого колеса з двома робочими поверхнями значно зменшує небажане осьове зусилля, яке виникає в процесі роботи машини. Для запобігання витоків робочої рідини передбачене торцеве ущільнення 7. Рідина надходить у проточну частину агрегату через підвід 4.

Принцип роботи гомогенізатора полягає в наступному: рідина надходить у проточну частину агрегату, де відбувається її розгін робочим колесом 2. При проходженні оброблюваного середовища через малі зазори й прорізи в роторних і статорних кільцях відбувається інтенсивне перемішування суспензії і доведення її до необхідної однорідної маси. Шляхом утворення вихрових структур відбувається перетворення механічної енергії в теплову, тому процес гомогенізації супроводжується підігрівом середовища. На виході з робочого колеса за рахунок відцентрових сил рідина виходить через кільцевий відвід 5 в напірний трубопровід, що забезпечує насосний ефект проточної частини.

Процес виробництва згущеного молока характеризується нагрівом до 95°C. Крім цього, робоче середовище характеризується підвищеною в'язкістю. Тому для

підвищення ресурсу ущільнення та зменшення втрат продукту було обрано торцеве ущільнення тандемного типу. Це дозволяє в камеру ущільнення подавати промивочну воду ( $t=10\div 20$  °C) та забезпечувати роботу пар тертя ущільнення на воді. Крім цього, ущільнююча камера є своєрідним термобар'єром, що зменшує передачу тепла через вал двигуна до його підшипників.

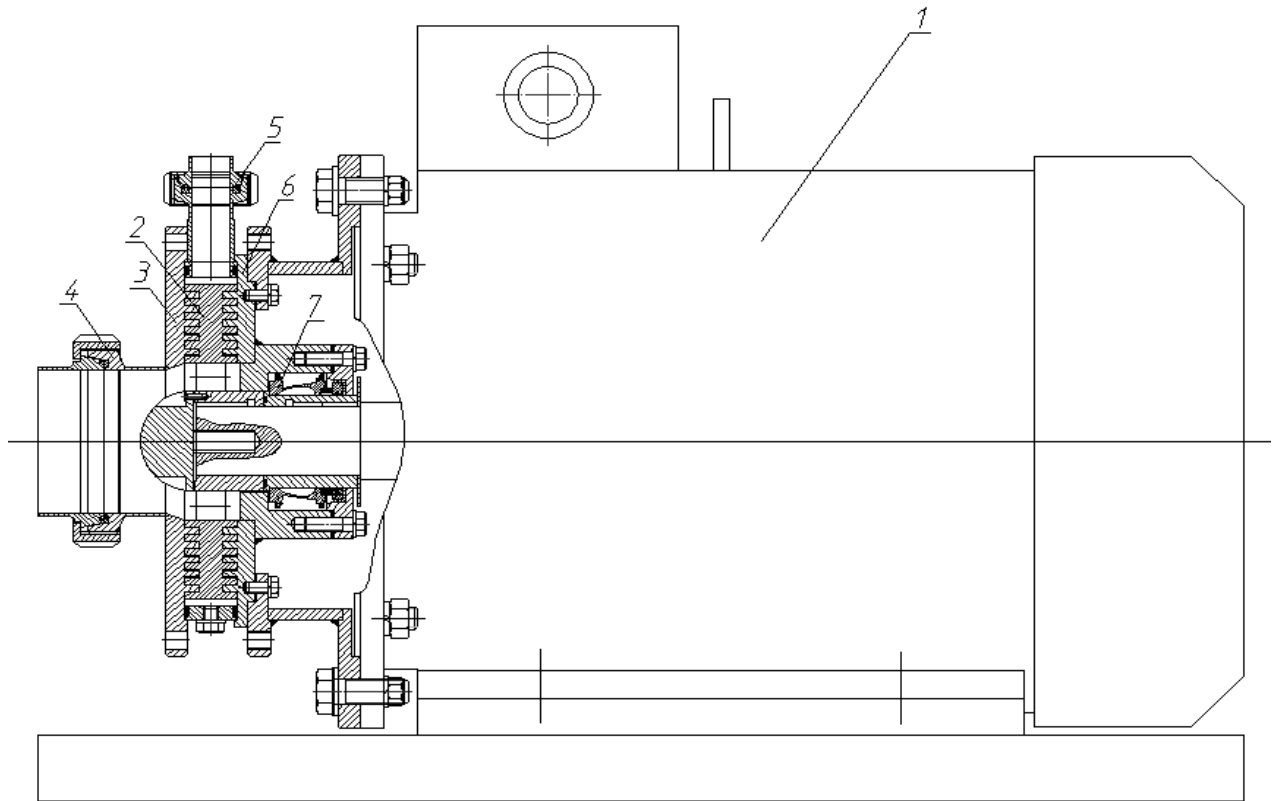


Рисунок 9 – Проточна частина гомогенізатора

Основна відмінність гомогенізатора від існуючих роторно-пульсаційних апаратів полягає в наступному:

1) гомогенізатор має різну кількість прорізів на роторі і статорі, що кардинально змінює принцип дії агрегату (при однаковій кількості прорізів на робочих органах виникають взаємні положення ротору та статору коли прохідні канали повністю перекриваються, що призводить до значної пульсації тиску). При роботі на двофазних робочих середовищах можливий абразивний знос робочих елементів, що призводить до збільшення зазору між ними та, як наслідок, зниження величини пульсації. Це зумовлює зниження ефективності обладнання в

цілому. За таких умов конструктивно зроблено ставку на пристрій, гомогенізуюча дія якого визначається ефективністю турбулізації потоку;

2) наявність на робочих органах агрегату елементів для турбулізації потоку у вигляді канавок на концентричних кільцях, які планується детально дослідити.

### *1.5 Технологічна лінія виготовлення згущеного молока з використанням роторно-динамічного агрегату гомогенізатора*

Враховуючи конструктивну схему, рекомендується вмонтувати в технологічну лінію для виробництва згущеного молока роторно-динамічний агрегат гомогенізатора паралельно з шестеренним насосом та блендером.

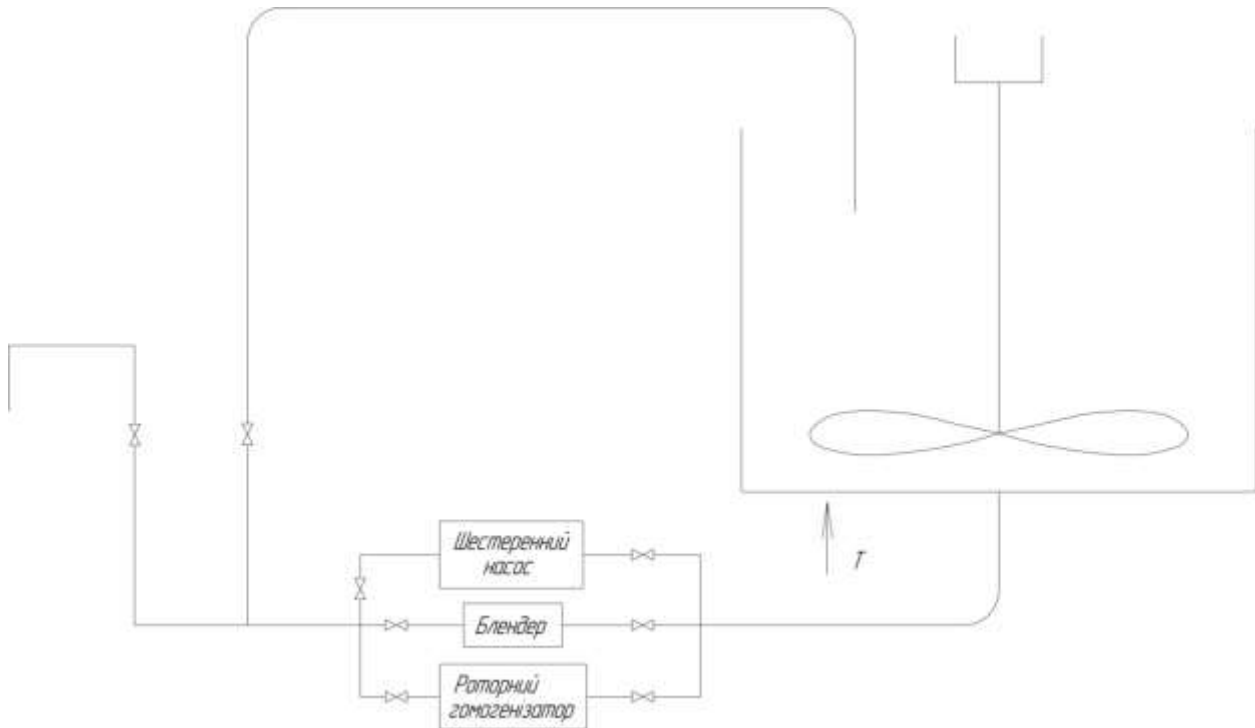


Рисунок 10 – Конструктивна схема технологічної лінії з використанням роторно-динамічного агрегата-гомогенізатора.



Рисунок 11 – Фото агрегата-гомогенізатора в технологічній лінії Комаровського молочного заводу.

В результаті конструктивних змін, шестеренний насос потрібний лише на стадії фасовки, так як функцію прокачування продукту по лінії буде виконувати нововведений в конструкцію роторно-динамічний гомогенізатор.

Також, в результаті конструктивних змін, блендер буде застосовуватися тільки на етапі вводу сухих компонентів.

Процес роботи цієї технологічної лінії по виробництву згущеного молока, буде мати наступну послідовність.

Ємність наповнюється молоком при температурі навколишнього середовища, потім вводиться цукор, суміш підігрівається до температури 95<sup>0</sup>С. Потім настає етап випаровування, після чого вводяться стабілізатори, ароматизатори, барвники, і вся ця суміш постійно проходить через гомогенізатор. Якщо суміш ще не достигла потрібної консистенції, то кран на лінії розфасовки закритий, а кран на лінії в бак відкритий. Під час проходження суміші через гомогенізатор, складові ретельно

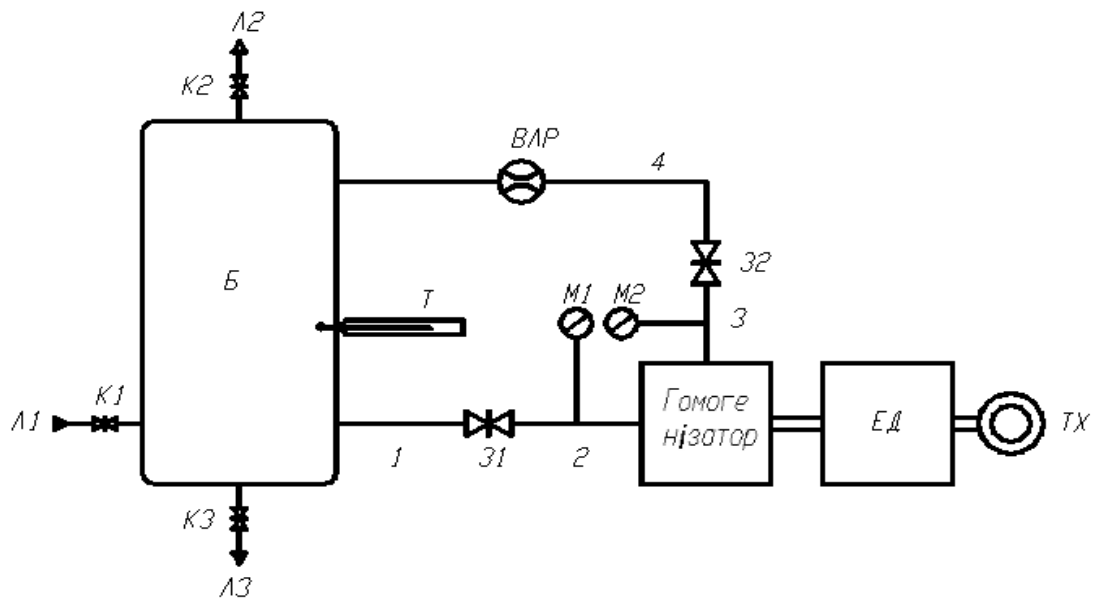
розкриваються, перемішуються, і внаслідок динамічних сил, суміш нагрівається. При отриманні потрібної консистенції продукту, кран на лінії в бак закривається, а натомість відкривається кран на лінії розфасовки. В результаті конструктивних змін технологічної лінії, продукт виходить більш високої якості, і сама технологічна лінія є більш енергоефективною.

### 1.6 Експериментальні показники агрегату гомогенізатора

Експериментальні дослідження обраного технічного об'єкту відбувалися в два етапи:

- перший етап дослідження передбачав визначення насосної та енергетичної характеристики агрегату в лабораторії Сумського державного університету;
- другий етап передбачав промислові випробування безпосередньо узаможника.

За таких умов на кафедрі прикладної гідроаеромеханіки СумДУ було розроблено стенд (рис. 12).



Риунок 12 – Принципова схема стенду для дослідження насосного ефекту гомогенізатора



Таблиця 1.3 – Умовні позначення принципової схеми стенду (до рис. 15)

Умовне позначення	Назва	Кількість	Примітка
ЕД	Асинхронний електродвигун	1	
ТХ	Тахометр	1	
Т	Термометр	1	
Б	Бак	1	V=5 м <sup>3</sup>
К1, К2, К3	Кран шаровий	3	
З1, З2	Засувка	2	
ВЛР	Витратомір	1	
М1, М2	Манометр	2	
Л1	Лінія заливки води	1	D <sub>y</sub> 15
Л2	Лінія випуску повітря	1	D <sub>y</sub> 15
Л3	Лінія зливання води	1	D <sub>y</sub> 15
1, 2	Всмоктувальна ділянка трубопроводу	2	D <sub>y</sub> 100
3	Напірна ділянка трубопроводу	1	D <sub>y</sub> 100
4	Напірна ділянка трубопроводу	2	D <sub>y</sub> 150

Стенд дає можливість проводити дослідження насосного ефекту гомогенізатора в діапазоні витрат 0 – 20 м<sup>3</sup>/годину та напором до 50 м. До основного обладнання входять: бак ємністю 5 м<sup>3</sup>, агрегат гомогенізатора з асинхронним двигуном 4А160S2У3 потужністю 22 кВт та синхронною частотою обертання 3000 об/хв, з'єднувальні трубопроводи, запірні арматура, пульти керування та контрольно-вимірювальні прилади.

Вимірювальна апаратура забезпечувала можливість визначення характеристик напору та потужності від величини витрати рідини через проточну частину агрегату згідно існуючих вимог [15]. До складу комплексу контрольно-вимірювальних приладів входили:

- комплекс ДМК 21 – для визначення електричної потужності, що споживається електродвигуном;
- манометр пружинний класу точності 0,15 з межею вимірювання 0,25 МПа для вимірювання тиску у всмоктуючому трубопроводі;

- манометр пружинний класу точності 0,4 з межею вимірювання 0,6 МПа для вимірювання тиску у напірному трубопроводі;
- тахометр механічний ТЧ10-Р для визначення частоти обертання ротору гомогенізатора;
- витратомір – ВЛР 150ЕК для визначення величини витрати рідини через проточну частину гомогенізатора з точністю 0,5%.

В результаті досліджень, які були проведені на базі акціонерного товариства «Комаровський молочний завод», були отримані характеристики агрегату-гомогенізатора при різних діаметрах робочого колеса, а саме  $d=220\text{мм}$  та  $d=200\text{мм}$ . Діаметр робочого колеса було вирішено підрізати з метою зменшення споживаної потужності агрегатом. Отримані результати відображені на графіках рис.15.



Рисунок 13 – Графіки експериментальних досліджень

На даних графіках відображені відрізками етапи процесу виробництва згущеного молока:

- Точка 1-2 – внесення до води цукру та сухого молока;
- точка 3-4 – внесення жиру при  $t=97^{\circ}\text{C}$ ;
- точка 4-5 – внесення стабілізаторів, консервантів;
- точка 5-6 – фасовка.

### 1.7 Розрахунково-аналітичне обґрунтування ефективності використання агрегата-гомогенізатора

В цілому методика проведення випробувань гомогенізатора по визначенню енергетичних характеристик ґрунтувалася на відпрацьованих рекомендаціях щодо випробувань гідравлічних машин [16]. Далі наведені загальні залежності, за якими визначалися необхідні характеристики.

При дослідженні насосного ефекту гомогенізатора енергетична характеристика визначалася електричним шляхом і обчислювалася наступним чином

$$N_{ем} = (W_1 + W_2 + W_3) \cdot K \cdot \eta_{ел} \cdot \left(\frac{n_H}{n_M}\right)^3$$

де  $N_{ем}$  – модельна (приведена) потужність гомогенізатора, Вт;

$W_1, W_2, W_3$  – показання ватметра по кожній фазі, Вт;

$K$  – коефіцієнт, який враховує схему підключення та режим роботи вимірювального приладу;

$\eta_{ел}$  – ККД електродвигуна, що відповідає режиму його роботи.

Напір, що створює гомогенізатор під час роботи, обчислювався за показаннями манометрів, які вимірювали величину тиску у всмоктуючій та напірній ділянках трубопроводів

$$H_M = \left[ \frac{\left(\frac{P_H \cdot P_2}{n_{2M}} - \frac{P_B \cdot P_1}{n_{1M}}\right) \cdot 10^6}{\rho \cdot g} + \frac{u_H^2 - u_B^2}{2 \cdot g} + Z_H - Z_B \right] \cdot \left(\frac{n_H}{n_M}\right)^2,$$

де  $H_M$  – модельний (приведений) напір, що створює гомогенізатор, м;

$P_B, P_H$  – показання манометрів у всмоктуючому та напірному трубопроводах, діл (ділень);

$P_1, P_2$  – межа вимірювання тиску манометрами у всмоктуючому та напірному мірних перетинах, МПа;

$n_{1M}, n_{2M}$  – кількість ділень манометрів на всмоктуючому та напірному мірних перетинах, діл.;

$\rho$  – густина робочого середовища, кг/м<sup>3</sup>;

$g$  – прискорення вільного падіння,  $g = 9,81$  м/с<sup>2</sup>;

$u_B, u_H$  – швидкість течії робочої рідини у всмоктуючому та напірному мірних перетинах, м/с;

$z_B, z_H$  – висота розташування манометрів, м.

Формула для визначення напору має вигляд  $H_M = \left[ \frac{(P_H \cdot P_2 - P_B \cdot P_1) \cdot 10^6}{n_{2M} \cdot n_{1M}} \right] \cdot \left( \frac{n_H}{n_M} \right)^2$

Величина приведеної витрати рідини через проточну частину гомогенізатора  $Q_M$  визначалася за формулою:  $Q_M = Q \cdot \left( \frac{n_H}{n_M} \right)$ ,

де  $Q$  – експериментально визначена величина витрати, м<sup>3</sup>/с.

На рис. 14 наведені експериментальні дані дослідження насосної та енергетичної характеристик роторнодинамічного агрегату-гомогенізатора з робочими колесами різного діаметру (характеристики позначені пунктиром 260 мм, лінією – 220 мм). З діаграми видно, що зменшення діаметру робочого колеса призводить до зниження потужності агрегату та призводить до підвищення його продуктивності. Слід відзначити, що додатково потребує вивчення питання зміна якості гомогенізації робочого середовища при зменшенні діаметру робочого колеса.

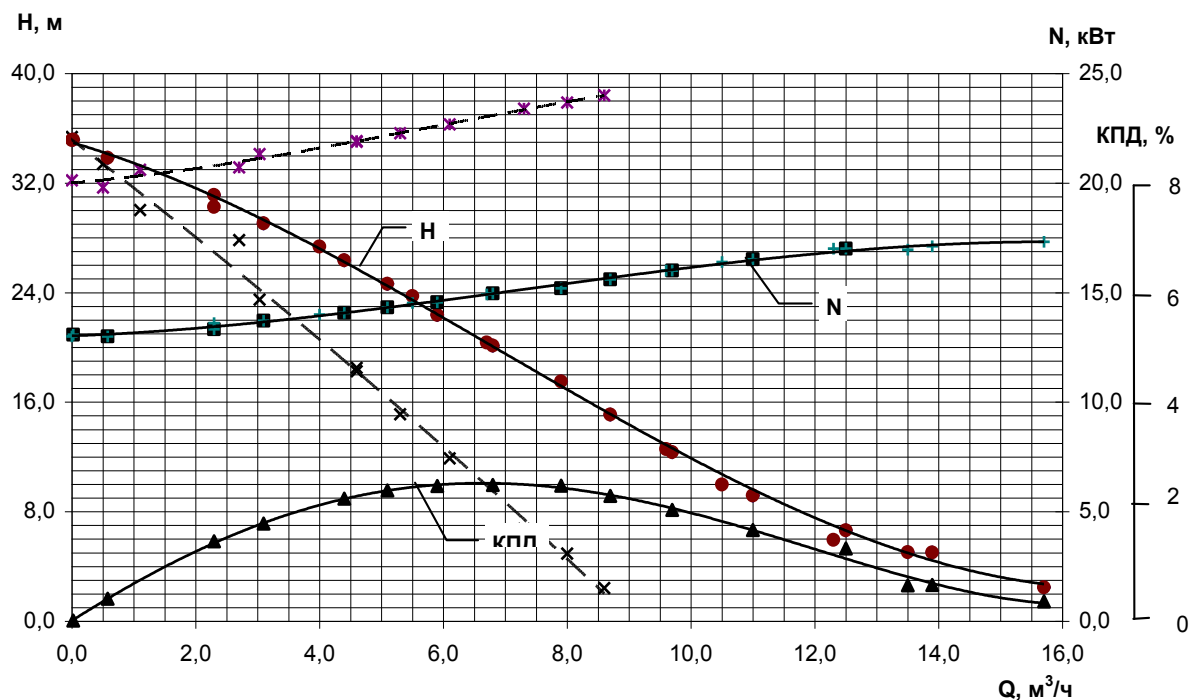


Рисунок 14 – Результати експериментального дослідження енергетичної та насосної характеристик агрегату

## 2. ВИКОРИСТАННЯ БАГАТОФУНКЦІОНАЛЬНОГО ТЕПЛОГЕНЕРУЮЧОГО АГРЕГАТУ ДЛЯ СИСТЕМ ОПАЛЕННЯ

Підвищення цін на енергоносії (зокрема на природній газ) змушує все більшу увагу приділяти енергоощадним технологіям. Що стосується комунальної сфери одним із головних резервів є вдосконалення систем опалення та гарячого водопостачання. Враховуючи різноманітність призначення тих чи інших будівель, особливості їх конструкції, територіальне розташування неможливо запропонувати один оптимальний шлях реконструкції. Як правило вирішення вказаних питань вимагає комплексного підходу [17]:

- вибір типу системи опалення (централізована, децентралізована);
- вибір типу енергоносія (природній газ, вугілля, дрова, брикети, електроенергія тощо);
- вибір опалювальних приладів (радіатори, конвектори);
- вибір добового графіку опалення.

У якості прикладу наведено результати модернізації системи опалення майстерень машинобудівного коледжу Сумського державного університету, які мають наступні характеристики. Приміщення одноповерхового типу має загальну площу близько 900 м<sup>2</sup>. У якості матеріалу стін використано цеглу. Площа вікон складає близько 30 % від площі зовнішніх стін. Тип початкової системи опалення – централізована. Теплові пристрої – трубні реєстри.

Запропоновано ефективність пілотного зразка системи опалення на базі ТГА визначити шляхом порівняльного аналізу витрат коштів на опалення протягом опалювального сезону за рахунок централізованої системи опалення та опалення протягом опалювального сезону на базі ТГА.

Таблиця 2.1. – Споживання теплової енергії майстернями машинобудівного коледжу СумДУ при опалення від централізованої системи.

	Період	Споживання теплової енергії на майстерні вцілому, Гкал	Споживання теплової енергії на виробничу ділянку, Гкал	Витрати на опалення, грн.
1	Жовтень	2,6	0,75	373,00
2	Листопад	9,12	2,645	1 309,00
3	Грудень	28,48	8,26	4 089,00
4	Січень	35,27	10,23	5 739,00
5	Лютий	36,58	10,61	5 952,00
6	Березень	24,32	7,05	3 955,00
7	Квітень	3,65	1,07	600,00
	Усього	140,02	40,62	22 017,00

Головною передумовою створення пілотної системи опалення на основі ТГА стали порівняно високі витрати на опалення та низький температурний режим (середня температура складала 12°C).

### *2.1 Конструктивна схема пілотної системи опалення*

Особливості пілотної системи опалення представлено на рис.15. Головними елементами вказаної системи є теплогенератор ТГА-15, тепловий акумулятор 2 на основі теплоємності робочого середовища, тепловий конвектор 3 з вентилятором, циркуляційний насос 4. Для забезпечення автономності роботи розроблено систему автоматичного керування ТК 112 МОД 2.

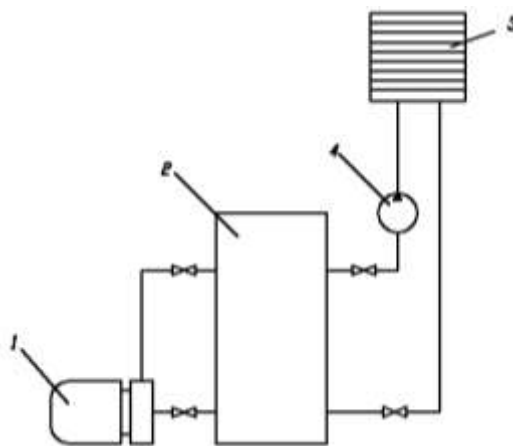


Рисунок 15 – Система опалення з тепловим акумулятором: 1-ТГА, 2-тепловий акумулятор, 3-тепловий конвектор, 4- циркуляційний насос

Система працює наступним чином. Привідний електродвигун обертає робоче колесо теплогенератора. За рахунок в'язкістних сил механічна енергія перетворюється в теплову енергію робочого середовища. Одночасно з процесом розігріву робочого середовища відбувається процес його перекачування. Таким чином відбувається розігрів теплоносія в тепловому акумуляторі. При включенні циркуляційного насосу відбувається подача теплоносія на конвектор. Вибір саме такого опалювального приладу виконувався на підставі можливості швидкого виходу на необхідний температурний режим.

Вказана система передбачає роботу за двома напрямками:

- робота теплогенератора та теплового конвектора одночасно протягом робочої зміни;
- робота теплогенератора в нічний час (зарядка теплового акумулятора) та його розрядка протягом робочої зміни.

Робота за першим напрямком передбачає споживання електроенергії за основним тарифом, в той час як другий дає можливість використання «нічного» тарифу електроенергії.

Характеристики зарядки та розрядки теплового акумулятора наведено в [18].

На рис. 16 та 17 наведено діаграми динаміки розігріву повітря в приміщенні, охолодження теплоносія в тепловому акумуляторі та температури повітря на виході з конвектора.

При аналізі ефективності роботи вказаної системи слід відзначити, що при високотемпературній зарядці теплового акумулятора (температура не нижче  $90^{\circ}\text{C}$ ) початковий розігрів повітря в приміщенні відбувається доволі швидко (протягом 30 хв. досягаються суб'єктивно прийнятні умови). При зниженні температури теплоносія до  $70^{\circ}\text{C}$  відповідно знижується й температура повітря на виході з теплового конвектора до  $30\text{-}35^{\circ}\text{C}$ , що створює суб'єктивне враження протягу. Для усунення цього негативного фактору доцільно встановити систему регулювання частоти обертання вентилятора теплового конвектора для зниження інтенсивності повітряного потоку, що в той же час дозволить реалізовувати більш повно розрядку теплоакумулятора.

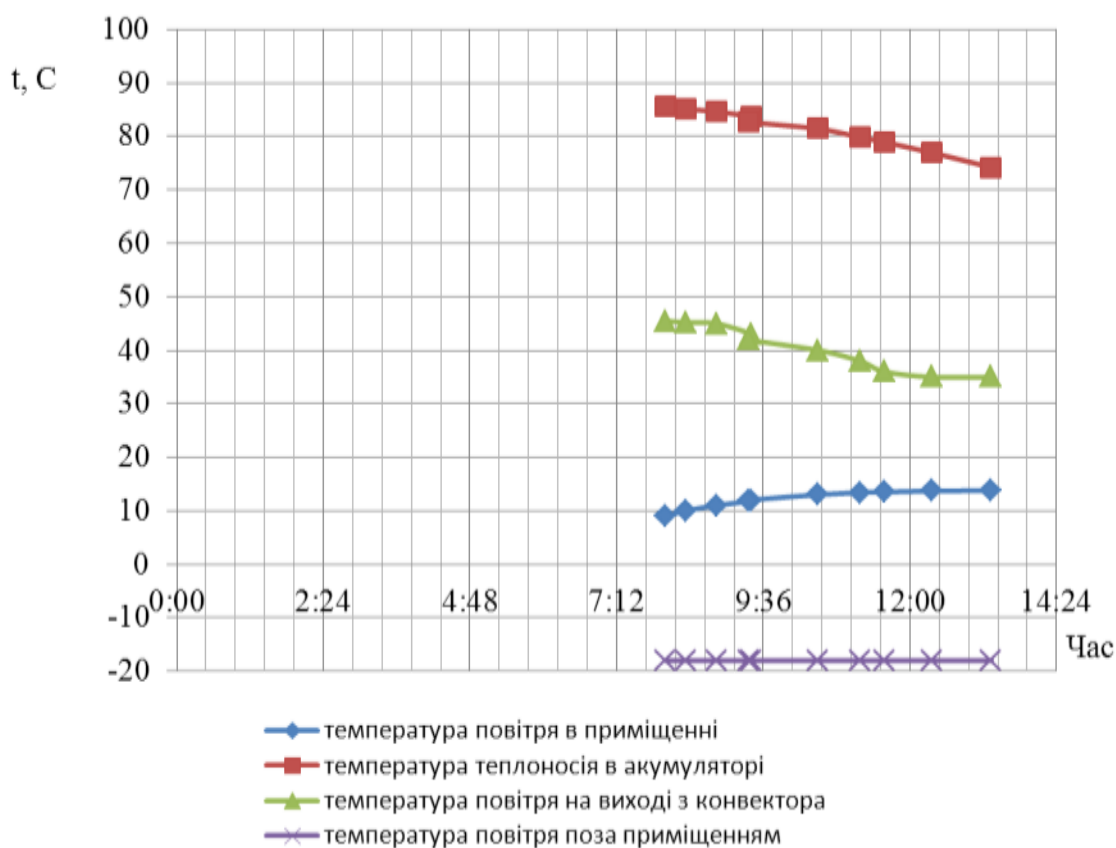


Рисунок 16 – Діаграма динаміки зміни температури в приміщенні, в теплому акумуляторі та теплому конвекторі



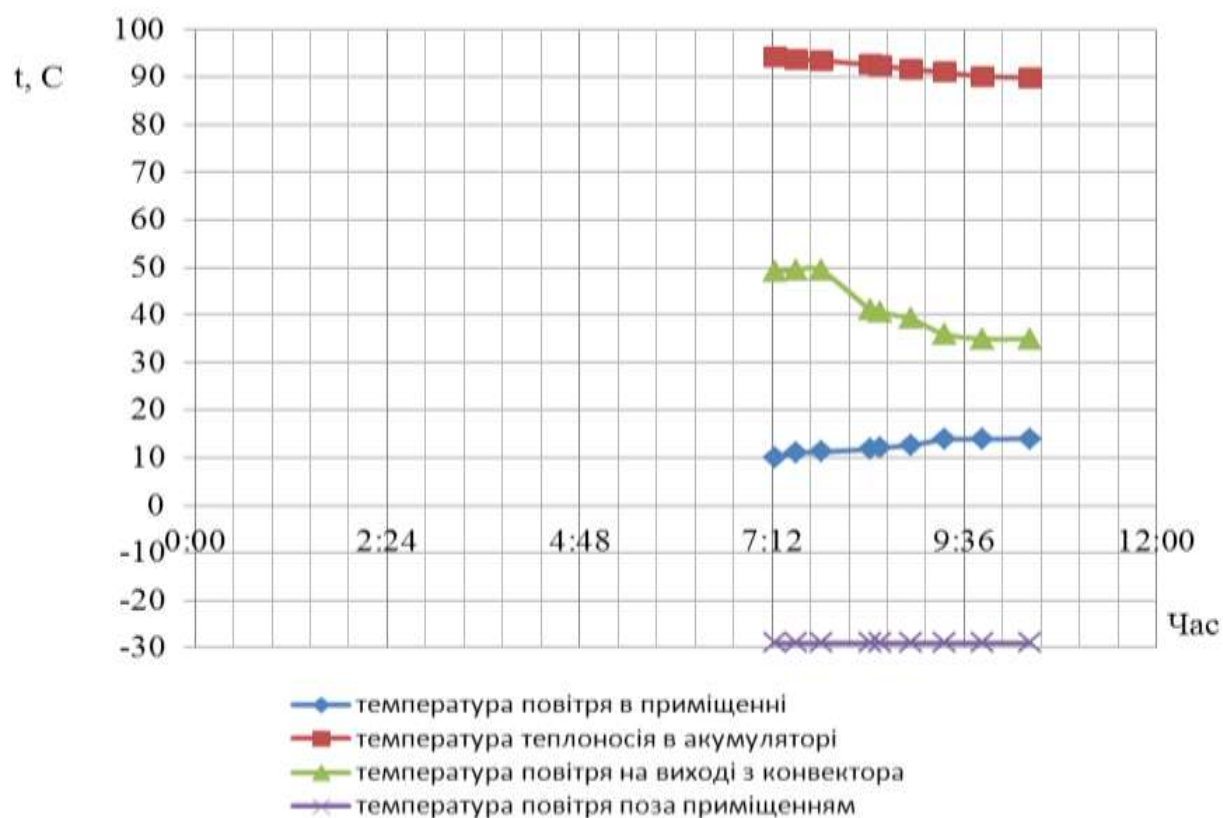


Рисунок 17 – Діаграма динаміки зміни температури в приміщенні, в тепловому акумуляторі та тепловому конвекторі

В табл.2 наведено інтегральні дані щодо ефективності використання пілотної системи опалення.

Таблиця 2.2 – Витрати на опалення майстерень машинобудівного коледжу СумДУ при використанні ТГА

№	Період	Споживання електричної енергії на виробничу ділянку, кВт годин	Витрати на опалення, грн.
1	Жовтень	1320	1 161,00
2	Листопад	2650	2 332,00
3	Грудень	4900	4 312,00
4	Січень	2500	2 775,00
5	Лютий	3460	3 840,00
6	Березень	1982	2 200,00
7	Квітень	850	943,00

При порівняння двох опалювальних сезонів можна зробити наступні висновки:

- за рахунок впровадження пілотного зразка системи опалення було досягнуто зниження витрат на 25%;
- протягом опалювального періоду протягом робочої зміни підтримувався більш високий температурний режим (близько 17°C);
- основні переваги та заощадження були певною мірою досягнуті за рахунок гнучкого графіку роботи системи опалення.

Крім вказаних переваг, пілотна система опалення має певні ресурси:

- доцільно встановити регулятор обертів теплового конвектора з метою більш повної розрядки теплового акумулятора;
- встановлення зонного лічильника енергії дозволить знизити тариф на 40% при попередньо встановленому графіку роботи.

### 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ КОНСТРУКТИВНИХ ТА РЕЖИМИНИХ ПАРАМЕТРІВ НА НАСОСНУ ХАРАКТЕРИСТИКУ ТЕПЛОГЕНЕРУЮЧОГО АГРЕГАТУ

#### *3.1 Постановка задачі дослідження*

При виробництві агрегатів ТГА та їх використанні було встановлено, що існує можливість регулювання їх роботи не тільки шляхом зміни конструктивних параметрів робочого колеса та частоти його обертання, але й за рахунок зміни конструктивних параметрів статорних апаратів. Крім того у ряді випадків існує необхідність прогнозування насосного ефекту агрегату з метою забезпечення технологічних вимог щодо транспортування робочого середовища. Раніше отримана математична модель не дозволяє враховувати зазначені параметри. За таких умов прийнято рішення щодо експериментального дослідження впливу конструкції статорного апарату та його діаметру на енергетичну та напірну характеристики теплогенеруючого агрегату. Для проведення дослідження було створено гідравлічний стенд (рис. 18), який працює по замкненій схемі.



Рисунок 18 – Експериментальний стенд ТГА

Гідравлічна принципова схема гідравлічного стенду наведена на рис. 19.

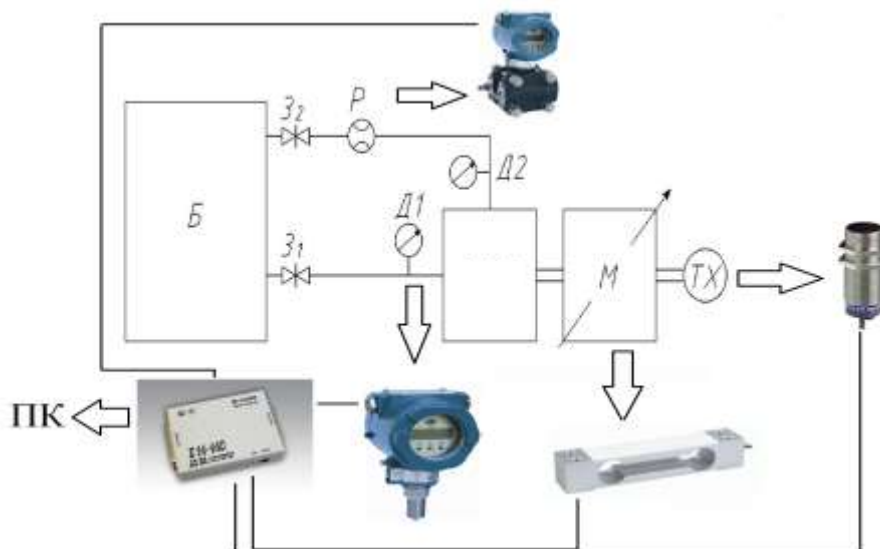


Рисунок 19 – Гідравлічна принципова схема експериментального стенду

Стенд складається з баку Б (1,5 м<sup>3</sup>), до якого за допомогою всмоктуючого та напірного трубопроводів приєднано дослідний ТГА. Привід агрегату здійснюється від балансирного двигуна постійного струму М. Для регулювання витрати рідини передбачено засувку З2. Вимірювальна апаратура забезпечила можливість проводити енергетичні випробування агрегату у відповідності до [16]. До складу комплексу вимірювальних приборів входили: датчик різності тиску «Сафір М», датчики надлишкового тиску «Сафір М», тензOMETричний датчик ZEMIC L6D-C3-5kg, індуктивний тахометр, цифрово-аналоговий перетворювач L-Card E14-140MD для перетворення аналогових сигналів датчиків в цифровий сигнал для ПК, ПК Lenovo V570 для збору та аналізу сигналів.

Конструкція проточної частини досліджуваного агрегату представлено на рис. 20. Досліджуваний зразок ТГА складається з кронштейну, в якому на підшипниках встановлено вал. До опорного фланця кронштейну кріпиться корпус. На валу встановлено робоче колесо (рис. 21), яке кріпиться гайкою-обтікачем. До корпусу кріпиться підвід. З двох боків робочого колеса встановлено статорні апарати. За допомогою дистанційних кілець існує можливість регулювання зазору між робочим колесом та статорними апаратами. Для герметизації валу передбачено торцеве ущільнення.

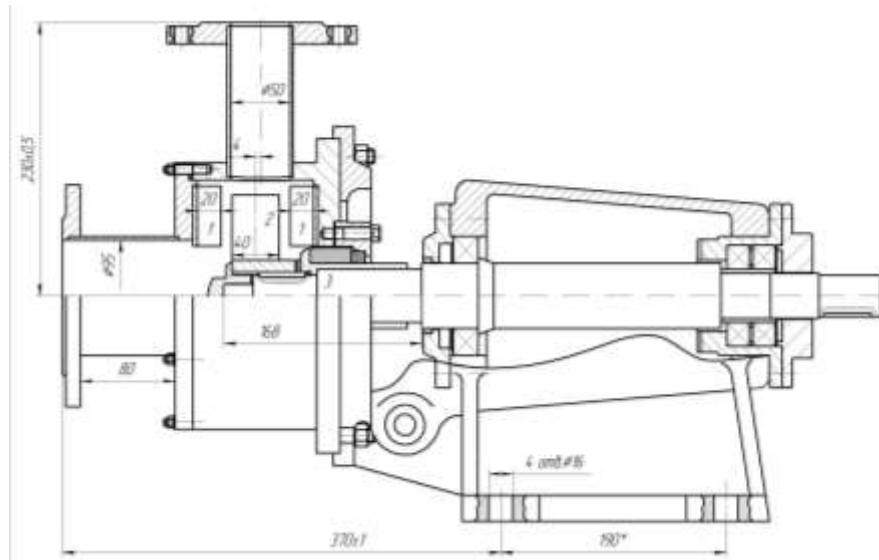
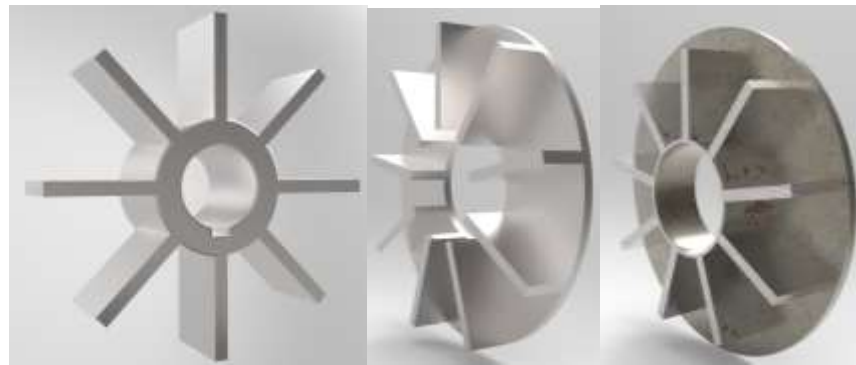


Рисунок 20 – Конструктивна схема досліджуваного ТГА



*a*

*b*

*c*

Рисунок 21 – Конструкція робочих органів: *a* – робоче колесо, *b* – статорний апарат без відбійного кільця, *c* – статорний апарат з відбійним кільцем

Експериментальне дослідження проводилося для наступних параметрів: діаметр робочого колеса – 170 мм, ширина робочого колеса 40 мм, ширина статорних апаратів – 20 мм, частота обертання 1500 об/хв, кількість лопатей робочого колеса – 8, кількість лопатей статорних апаратів – 9, зазор 2,5. Параметри, які варіювалися, – зовнішній діаметр статорних апаратів – 160-185 мм, витрата рідини – 0-4,5 м<sup>3</sup>/год. Фактори, що визначалися, - потужність, напір, насосний ефект (відсоток енергії, що витрачається на перекачування).

### 3.2 Результати експериментального дослідження

Результати експериментального дослідження представлено у вигляді характеристик на рис. 6.

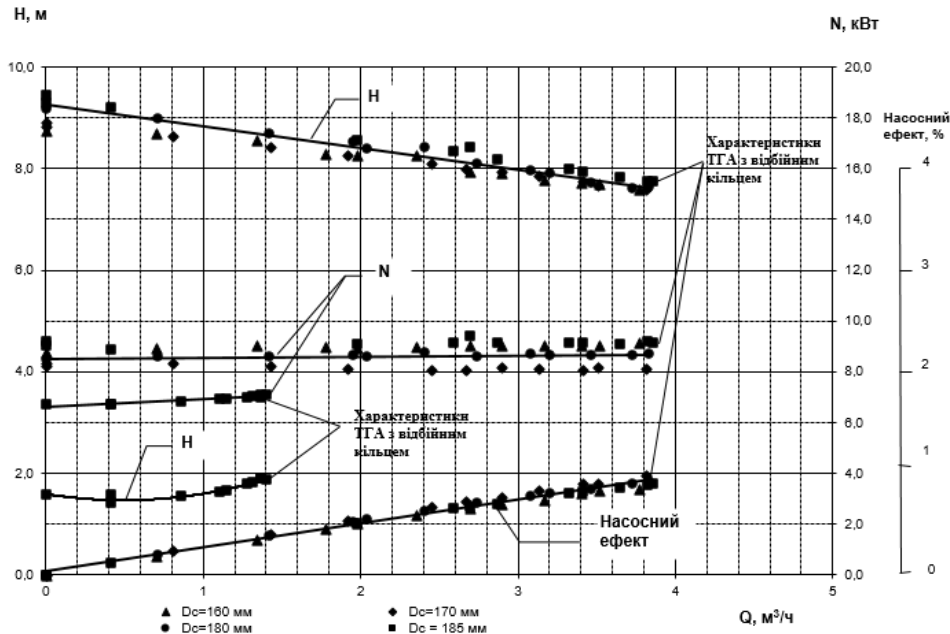


Рисунок 22 – Експериментальні характеристики ТГА

Аналізуючи отримані результати можна зробити висновки, що збільшення діаметру статорного апарату відносно діаметру робочого колеса до 10 % призводить до підвищення напору до 5% та забезпечення більш якісної гідравлічної взаємодії вихрових потоків, що зумовлює підвищення потужності агрегату до 5%. Підвищення напору можна пояснити перетворенням кінетичної енергії потоку (кутова складова швидкості) в потенційну енергію. Окремо слід відзначити, що використання в статорних апаратах відбійних кілець, встановлених на внутрішньому діаметрі, призводить до підвищення напору майже в 3 рази. При цьому споживана потужність збільшується до 25%.

Проведене експериментальне дослідження дозволяє зробити наступні узагальнюючі висновки:

- з метою підвищення насосного ефекту ТГА та забезпечення більш ефективної енергетичної взаємодії в проточній частині доцільно використовувати статорні апарати з відбійними кільцями на внутрішньому діаметрі лопатей.

При цьому можна досягти підвищення напору на 200-300%, а підвищення енергетичної ефективності до 25%;

- варіювання зовнішнього діаметру статорних апаратів в межах 0,95-1,08 діаметру робочого колеса призводить до зміни напору до 5% та потужності до 5%.
- доцільно дослідити вплив внутрішнього діаметру статору та наявності відбійних кілце на зовнішньому діаметрі статору на напірну та енергетичну характеристику ТГА.

Узагальнення результатів аналітичного, експериментального та розрахункового дослідження ТГА дасть можливість отримати напівемпіричну математичну модель прогнозування робочих характеристик теплогенеруючих агрегатів.

#### 4. ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ВИХРОВОГО РУХУ НА ГІДРОДИНАМІКУ ПОТОКУ

У певних випадках енергозбереження може бути досягнуто за рахунок узгодження характеристик багатofункціонального обладнання та трубопровідних мереж та використання ефективних систем керування [19]. За таких умов більш доцільним є не тільки підвищення ефективності насосної частини, але й вдосконалення насосної системи (разом з трубопровідною мережею) в цілому. Однією із задач даної роботи є дослідити можливість підвищення ККД за рахунок створення вихрового руху в трубопровідній мережі, тобто досягти підвищення ефективності всієї системи.

В статті [20] було показано, що в природі переважає вихровий рух. На відміну від технічних гідравлічних систем, в яких використовуються рівні труби круглого перерізу, в природі всі явища протікають по криволінійним траєкторіям і мають вихровий характер. Таким чином, було висунуто припущення, що оптимальною буде система, в якій рух рідини буде відбуватися завдяки спеціально створеним вихровим течіям.

Проведення фізичного експерименту показало, що втрати в дослідних гелікоїдних трубах (рис. 23) перевищують втрати у рівній трубі. Тому для досконалого вивчення руху течії проведено чисельний розрахунок в програмі ANSYS CFX.



Рисунок 23 – Гелікоїдна труба



Для детального вивчення руху течії і отримання картин руху рідини в гелікоїдних та спіральних трубах, було проведено чисельний розрахунок в ANSYS CFX. Постановка такої задачі дозволить проаналізувати отримані результати, виявити можливість оптимізації геометрії дослідних труб. Отримання картин течії є однією з головних задач проведення даної роботи.

#### 4.1 Опис проведення розрахунку

Для побудови геометрії спіральної, рівної та гелікоїдної труб використовувалася програма SolidWorks.

Діаметр дослідної труби  $d_y = 15\text{мм}$  довжина труби  $l = 1800\text{мм}$ , загальна висота  $H = 1000\text{мм}$ , крок витків  $p = 620\text{мм}$ , діаметр гелікоїда  $D_{hel} = 620\text{мм}$ .

Розрахункова сітка (рис. 24) була створена у компоненті програмного комплексу ANSYS, і приблизно нараховувала 2,7 млн. комірок. Для належного опису пограничних шарів поблизу твердої стінки було створено 6 призматичних шарів. Густина рідини при розрахунку була прийнятою за постійну величину. Моделювання турбулентних течій виконувалося за допомогою системи рівнянь Рейнольдса, для замикання котрих використовувалася стандартна k-ε модель турбулентності. Розрахунок у вказаному програмному продукті виконувався шляхом чисельного розв'язання системи рівнянь, котрі описують найбільш загальний випадок руху рідкого середовища - рівнянь Нав'є-Стокса та нерозривності.

$$\begin{cases} \vec{F} - \frac{1}{\rho} \text{grad}(p) + \nu \nabla^2 \vec{v} = \frac{d\vec{v}}{dt} \\ \frac{d\rho}{dt} + \text{div}(\rho \vec{v}) = 0 \end{cases}$$

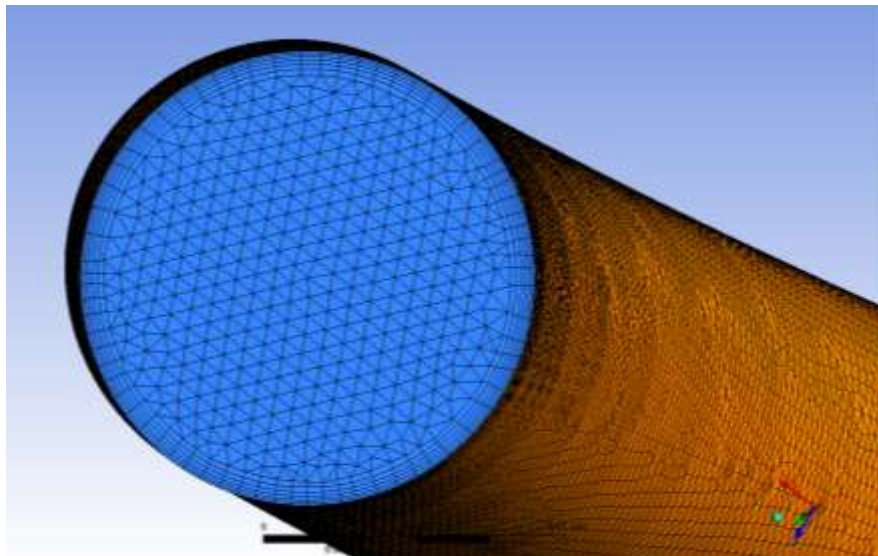
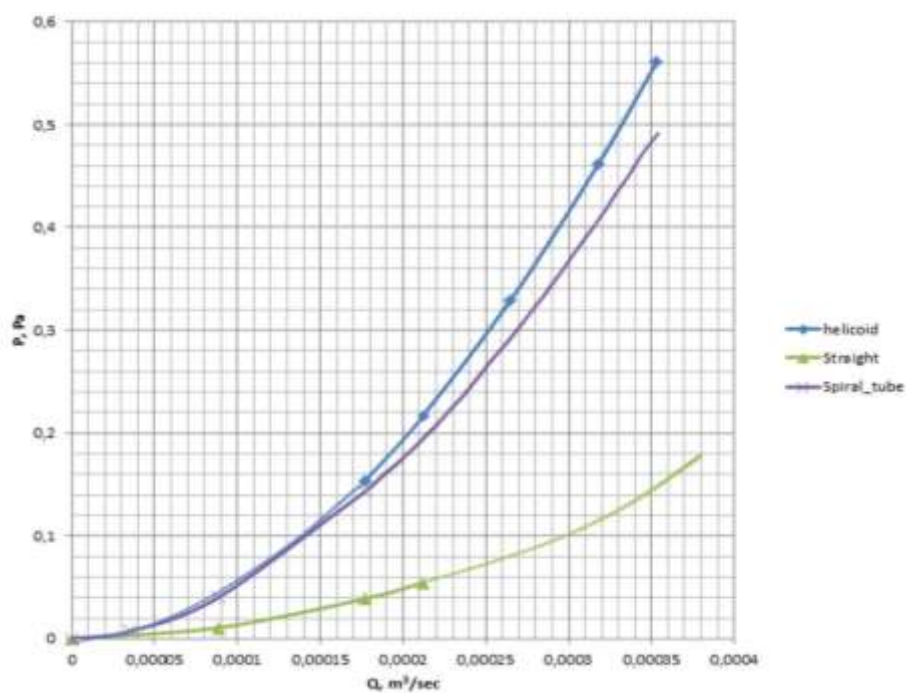


Рисунок 24 – Розрахункова сітка

Граничними умовами на вході була швидкість, на виході умова – відкритий вихід. Коефіцієнт відповідності результату  $1 \cdot 10^{-5}$ . Завершення розрахунку відбудеться при досягненні коефіцієнту відповідності, або при обчисленні максимальної кількості ітерацій, що за умовою становить 300 шт.

Результати втрат напору в розрахункових трубах представлені на рисунку 25. Найбільші втрати виявилися в гелікоїдній трубі.



## Рисунок 25 – Залежність втрат напору від витрати рідини

Було отримано картину руху течії (рис.26) за допомогою побудови ліній току. Відображення ліній току показано у вигляді трубок, товщина яких складає 0,6 мм. На рисунку добре видно, що у місцях повороту гнучкої труби відбувається переверт течії, що описано у роботах Шаубергера [20].

Отримані картини тиску в перерізах на вході, виході і в місцях повороту труби показують нерівномірний розподіл. Картина розподілу тиску в рівній трубці (рис.28) показує зміну тиску лише в зоні пограничного шару.

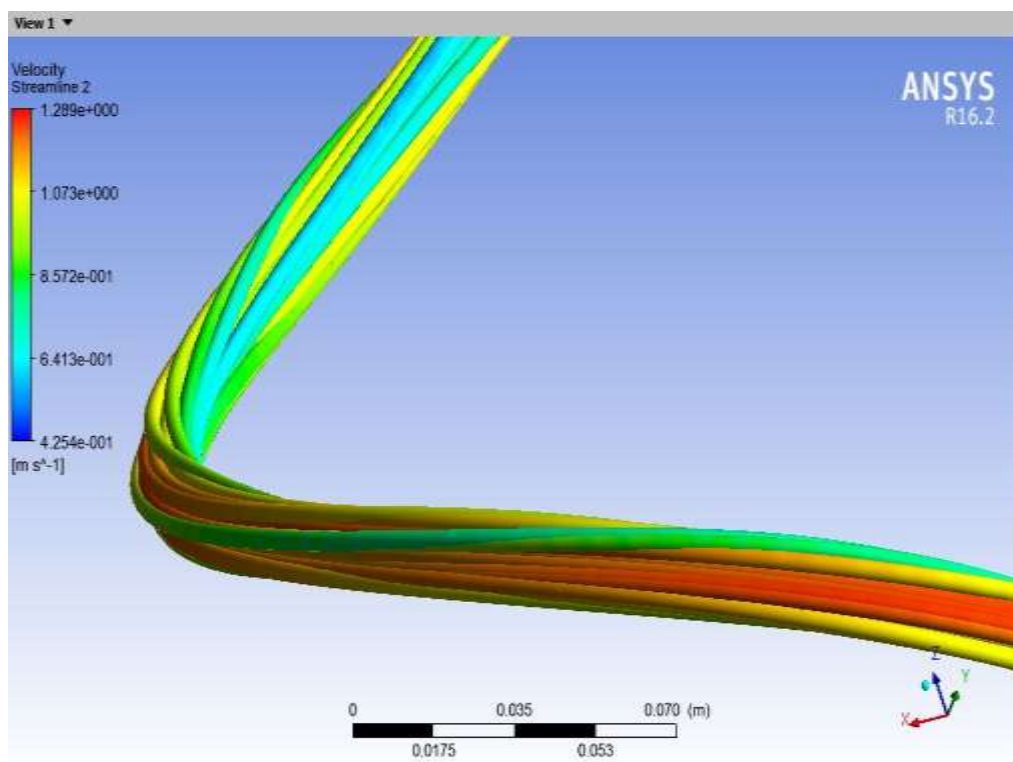


Рисунок 26 – Структура течії в місцях повороту гнучкої труби.

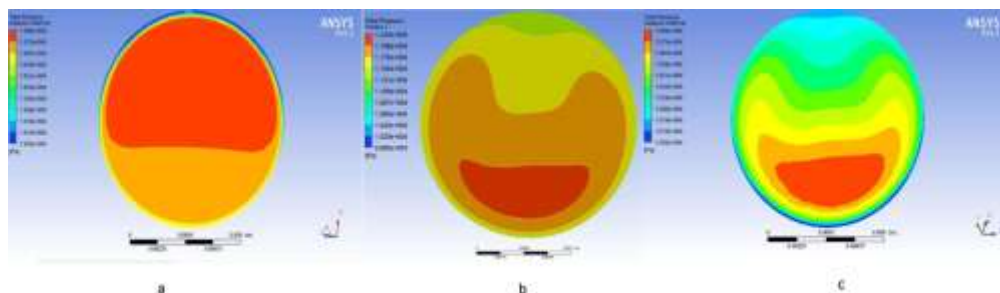


Рисунок 27 – а-розподіл тиску на вході; б-розподіл тиску в повороті гелікоїда; с-розподіл тиску на виході.

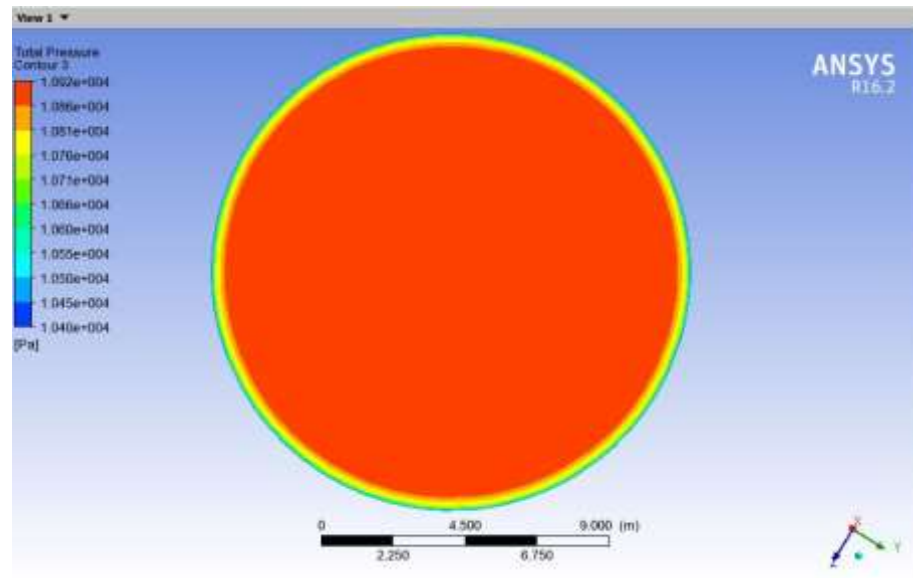


Рисунок 28 – розподіл тиску в рівній трубі

На рисунку 29 показано вектори швидкості в гелікоїдній трубі, які також вказують на нерівномірний розподіл ліній току і закрутку потоку.

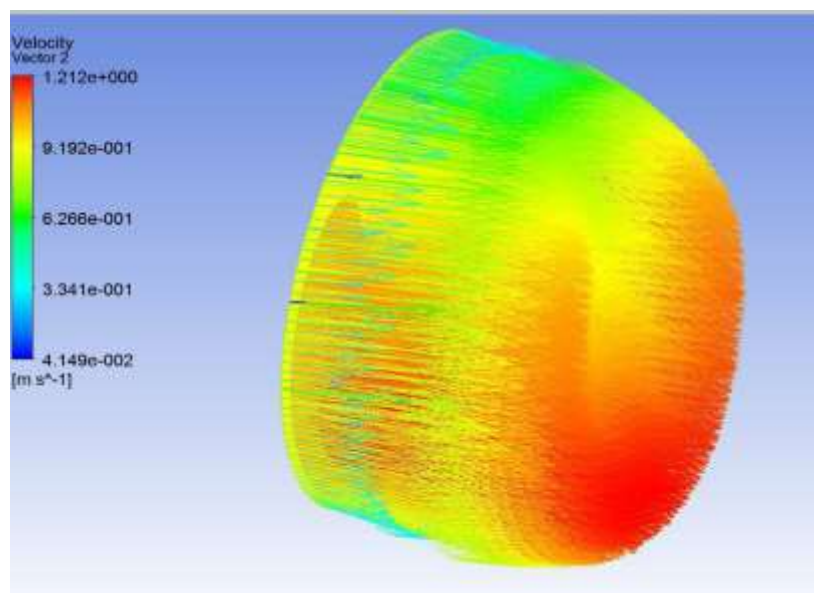


Рисунок 29 – Вектори швидкості в гелікоїдній трубі

Враховуючи сучасні потреби в енергозбереженні, дослідження в напрямку регулювання втрат за рахунок мережі є досить актуальним. Аналіз протікання рідини в гелікоїдних та спіральних трубах дозволить створити таку структуру руху рідини, яка забезпечуватиме менші втрати на тертя.

За допомогою програмного пакета ANSYS було отримано картини руху течії, що дозволяє простежити характер руху рідини і вплив геометрії гелікоїду на цей рух.

#### 4.2 Експериментальне дослідження вихрового руху

Для проведення власних експериментів і дослідження руху в спіральних трубах, в СумДУ на кафедрі ПГМ був розроблений та виготовлений експериментальний стенд.

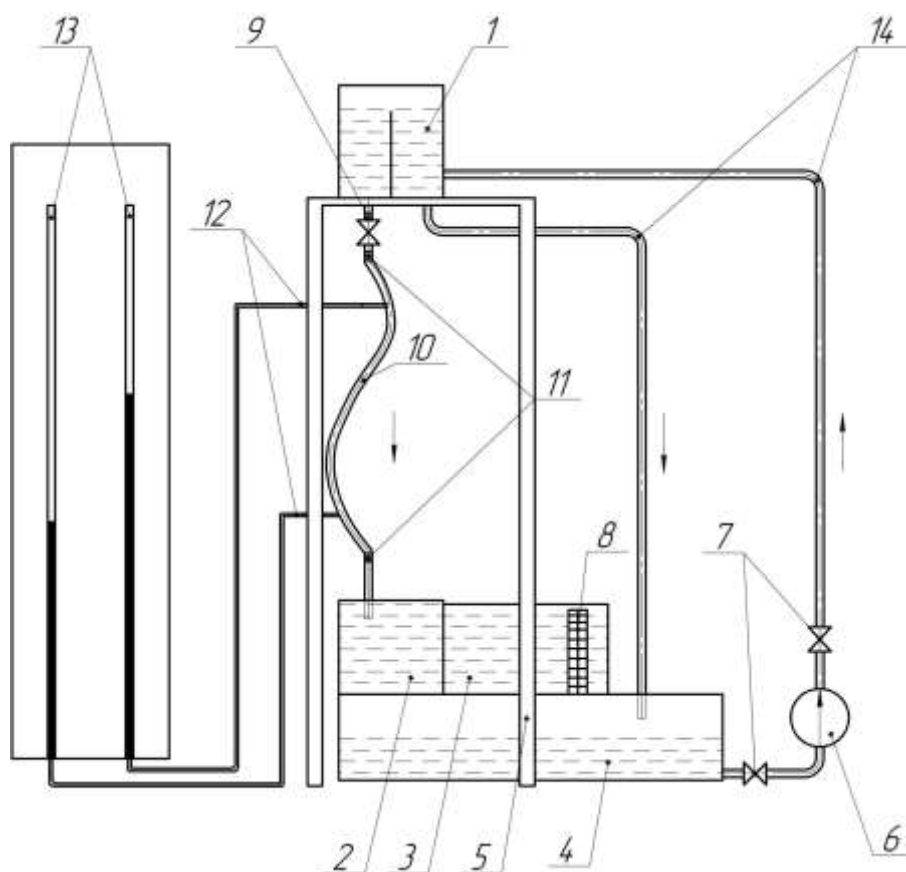


Рисунок 30 – Схема дослідної установки

Дослідна установка (рис. 30) складається із: верхнього баку 1, що встановлений на зварній рамі 5 ( $H=2$  м), приймального баку 2, мірного баку 3, зливного баку 4, електронасосу 6, кранів 7, шкали для заміру об'єму рідини 8, крану для регулювання витрат 9, дослідної трубки 10, хомутів для кріплення трубки 11, трубок для відбору тиску 12, п'єзометричних трубок 13, трубопровідної мережі системи 14. Напірний бак 1 має перегородку для забезпечення постійного рівня рідини під час експерименту.

Під час роботи насос 6 нагнітає робочу рідину в напірний бак 1. У напірному баці надлишкова рідина стікає до зливного баку 4 по трубопроводу 14. Витрати заміряються об'ємним способом за допомогою шкали в мірному баці 8 і секундоміра. Різниця перепадів рівнів п'єзометрів показує величину втрат. Дані заносяться до протоколу, а потім будується характеристика.

Отримані результати представлено на рис. 31.

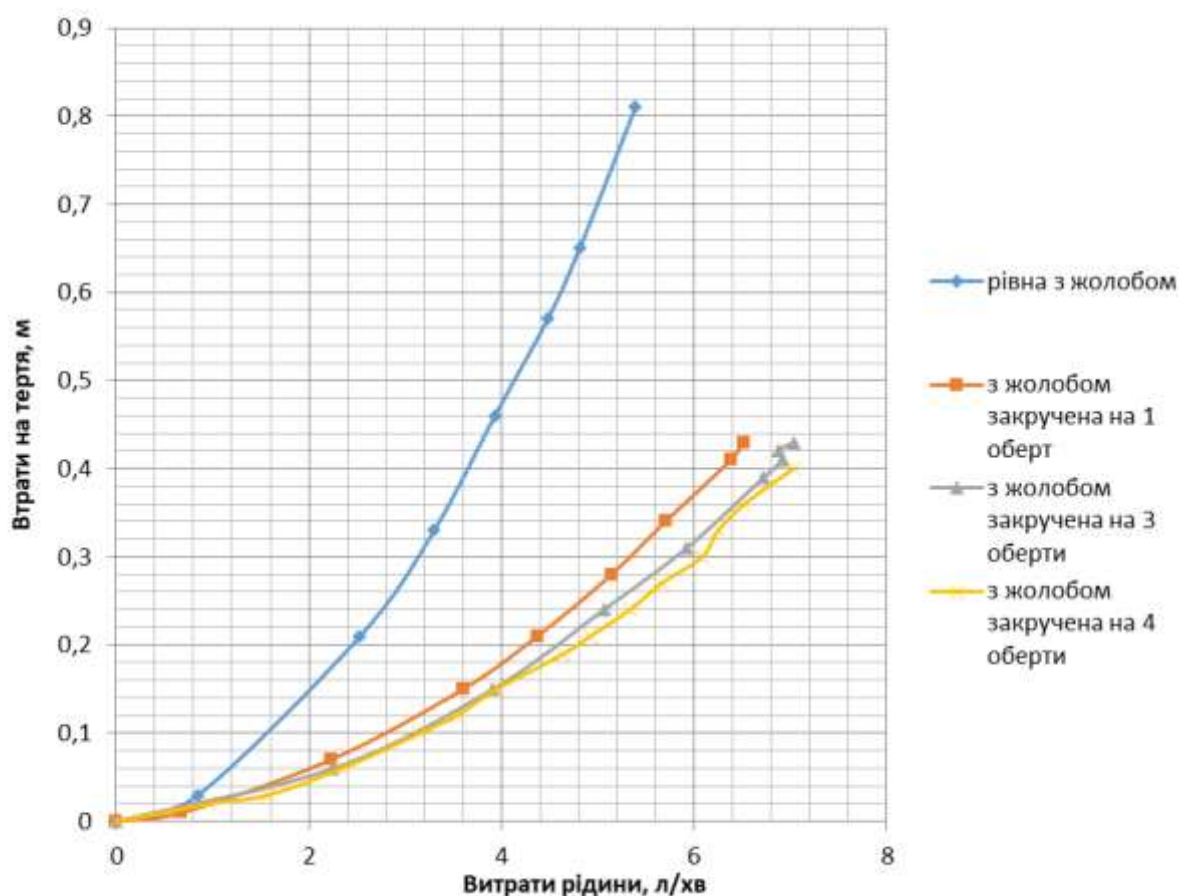


Рисунок 31 – Витрати в спіральних трубах

Таким чином, за даним графіком ми бачимо, що спіральна закрутка труби дає позитивний результат - зменшення втрат в напорі.

Планується додаткова серія випробувань для визначення найкращої форми труби, яка буде забезпечувати більш ефективний рух. Більш детальне вивчення спірального руху дасть можливість використання спіральних елементів в насосах.



Рисунок 32 – 3D модель корпусу з спіральними елементами

## ВИСНОВКИ

У звіті представлені результати наукової роботи, що велася на кафедрі прикладної гідроаеромеханіки Сумського державного університету, по модернізації технологічної лінії виробництва згущеного молока та створенню пілотної систем опалення шляхом впровадження багатофункціонального теплогенеруючого агрегату. Роботи, які були присвячені розрахунку, фізичному моделюванню в умовах лабораторії кафедри ПГМ СумДУ та випробуванню дослідного зразка багатофункціонального теплогенеруючого агрегату у промислових умовах ТОВ «Комаровський молочний завод» дозволили знизити енерговитрати на виробництво згущеного молока близько 25%, підвищити якість готового продукту та знизити витрати сировини.

Наступним напрямком впровадження, яке шляхом впровадження підтвердило економічну доцільність, є використання багатофункціонального теплогенеруючого агрегату для систем опалення майстерень машинобудівного коледжу. Крім цього, вирішено ряд задач щодо дослідження насосного ефекту багатофункціональних ТГА та можливості його підсилення за рахунок конструктивних змін.



## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Ковальов С. Ф. Багатофункціональні теплогенеруючі агрегати та їх використання для перспективних технологій спиртової промисловості/ С. Ф. Ковальов, А. А. Папченко // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. – Науковий журнал № 3 (109), 2007, Ч.1 – Луганськ 2007. – С. 124 – 128.
2. Папченко А. А. Использование теплогенерирующего агрегата в технологических процессах животноводства/ А. А. Папченко // Збірник наукових праць (Удосконалення турбоустановок методами математичного і фізичного моделювання). – Харків: ІПМаш ім. А.М. Підгорного НАН України, 2003. – С. 611–613.
3. Волков Н. И. Многофункциональный теплогенерирующий агрегат и его использование для приготовления кормовых смесей в сельскохозяйственных предприятиях/ Н. И. Волков, А. А. Папченко // Всеукраїнський науково-технічний журнал “Промислова гідравліка і пневматика”. – Вінниця, 2004. №1(3). – С. 99–102.
4. Євтушенко А. О. Розробка багатофункціонального теплогенеруючого агрегату-гомогенізатора для приготування біологічних добавок / А. О. Євтушенко, С. Ф. Ковальов, М. С. Овчаренко, А. А. Папченко // Вестник национального технического университета Украины «КПИ». Серия "Машиностроение", Киев. – 2007. – 53 с.
5. Євтушенко А.О. Розробка і створення багатофункціонального ТГА-гомогенізатора для реалізації технологічного процесу приготування ліквіфостронга / А. О. Євтушенко, А. А. Папченко, М. С. Овчаренко, О. М. Семенов // Матеріали науково-технічної конференції викладачів, співробітників, аспірантів та студентів. – Суми: Вид-во СумДУ, 2009. – 26 с.

6. Папченко А. А. Передумови використання роторно-динамічних теплогенеруючих агрегатів-гомогенізаторів для технологій лакофарбової промисловості / А. А. Папченко, М. С. Овчаренко, А. В. Білозьоров // Ж. Вісник СумДУ, Суми, 2010. – № 3, т.1.

7. Євтушенко А.О. Удосконалення технології переробки молока за рахунок роторно-динамічних гомогенізаторів моноблочного виконання / А. О. Євтушенко, А. А. Папченко, В. В. Коломієць, М. С. Овчаренко // Ж. Вісник СумДУ, Суми, 2010, № 2. – С.44–50.

8. Євтушенко А.О. Шляхи підвищення ефективності роторних теплогенеруючих агрегатів-гомогенізаторів / А. О. Євтушенко, А. А. Папченко, В. В. Коломієць, М. С. Овчаренко // Ж. Промислова гідраліка і пневматика, Вінниця, 2010, № 1. – С.95–99.

9. Папченко А. А. Технологічні теплогенеруючі агрегати / А. А. Папченко, А. О. Євтушенко, С. Ф. Ковальов та ін.// Монографія. – Суми: Сумський державний університет, 2012. – 120 с.

10. Кокушкин О.А. О расчете мощности ротационных аппаратов / О. А. Кокушкин, А. А. Барам, И. С. Павлушенко // Химическое машиностроение. – 1969. – № 8.

11. Барам А. А. Расчет мощности аппаратов роторно-пульсационного типа / А. А. Барам, П. П. Дерко, Б. А. Клоцунг // Химическое и нефтяное машиностроение. 1978. – № 4. –С. 5–6.

12. Дерко П. П. О гидромеханических закономерностях работы роторно-пульсационных аппаратов / П. П. Дерко, А. А. Барам, В. Б. Коган и др. // ТОХТ 1973. – Т.7, №1. – С. 123–125.

13. Балабудкин М. А. Роторно-пульсационные аппараты в химико-фармацевтической промышленности / М. А. Балабудкин // Медицина, 1983. – 160 с.

14. Папченко А. А. Розрахунок та проектування багатофункціональних теплогенеруючих агрегатів-гідромлинів: монографія / А. А. Папченко, С. Ф. Ковальов, М. С. Овчаренко та ін.. – Суми: Сумський державний університет, 2013. – 128 с.

15. Яременко О. В. Испытания насосов / О. В. Яременко // Справочное пособие. – М.: Машиностроение, 1976. – 225 с.
16. ГОСТ 6134-87. Насосы динамические, методы испытаний. - Введ.01.01.89. – М.: Изд-во стандартов, 1988. – 29 с.
17. Папченко А. А. Створення енергоефективних систем опалення та гарячого водопостачання на базі теплогенеруючих агрегатів/ А. А. Папченко // Вісник Сумського державного університету. Серія технічні науки, Суми, 2011, №1. – С.163–167.
18. Ковальов С. Ф. Результати впровадження теплогенеруючих агрегатів для систем опалення / С. Ф. Ковальов, М. С. Овчаренко, А. А. Папченко // Вісник Сумського державного університету. Серія технічні науки, Суми, 2011, № 4. – С.173–179.
19. Лобуренко М. В. Аналіз спірального вихрового руху рідин та можливості його використання у гідравлічних система / М. В. Лобуренко, А. А. Папченко, О. А. Матвієнко // Вісник НТУУ "ХПІ" : зб. наук. пр. Темат. вип. : Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. Харків : НТУ "ХПІ", 2016. – № 10 (1182). – С. 163–170.
20. Viktor Schaubberger: The Energy Evolution ; [ Callum Coats (ed.)] – Gateway Books, Bath – 2000. – 222 p.