

Студентська наукова робота

Шифр «Агрегат-гомогенізатор»

РОЗРОБКА РОТОРНОДИНАМІЧНОГО АГРЕГАТУ ГОМОГЕНІЗАТОРА  
ДЛЯ ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОБНИЦТВА ЗГУЩЕНОГО МОЛОКА

## Зміст

### Вступ

1. Стан проблеми, та актуальність проведення досліджень.
  - 1.1 Конструктивні аналоги, та область застосування.
  - 1.2 Актуальність дослідження.
  - 1.3 Постановка задач дослідження.
  - 1.4 Вибір технічного об'єкту та методів проведення досліджень.
2. Вибір конструктивної схеми роторно-динамічного агрегата гомогенізатора для виробництва згущеного молока, та розрахунок його енергетичних характеристик.
  - 2.1 Моделі розрахунку енергетичних характеристик.
  - 2.2 Конструктивна схема.
  - 2.3 Експериментальні показники агрегата гомогенізатора.
  - 2.4 Розрахунково-аналітичне обґрунтування ефективності використання роторно-динамічного агрегата гомогенізатора для виробництва згущеного молока.

### Висновки

### Список використаних джерел

## **Вступ**

Існуюче сьогодні будуватиметься 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 роторно-динамічних агрегатів-гомогенізаторів, які успішно використовуються в харчовій промисловості (виробництво майонезу, молока, згущеного молока, соків з м'якоттю та сумішей на їх основі тощо). Суть процесу полягає в поетапному змішуванні ряду компонентів (як рідин так і порошкоподібних). При цьому характеристики готового продукту контролюються за показниками однорідності та гранулометричним складом.

Роторно-динамічні агрегати-гомогенізатори мають цілу низку переваг в порівнянні з іншими пристроями, які збуджують коливання різного спектру частоти та інтенсивності в оброблюваному середовищі.

Перевага вказаних агрегатів обумовлена тим, що в них реалізуються різні фактори впливу на оброблюване середовище:

- механічна дія робочих частин агрегату на потік рідини, що приводить до його турбулізації, виникнення великих градієнтів зсувних напружень, зрізаючих зусиль;
- акустичний вплив на потік оброблюваного середовища, що виражається у виникненні пульсацій динамічного тиску, вторинних нелінійних акустичних ефектів.

Крім того, за рахунок дисипації частини підведеної енергії в тепло, особливо в радіальному зазорі між ротором і статором, відбувається нагрів оброблюваного середовища.

Таким чином, роторно-динамічні агрегати-гомогенізатори відносяться до найбільш ефективного обладнання для проведення і інтенсифікації гідромеханічних і тепломасообмінних процесів.

## **1. Стан проблеми та актуальність проведення дослідження.**

### **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 роторно-динамічні агрегати-гомгоенізатори.

До аналогів вказаного обладнання 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 роторно-динамічним агрегатом-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, проведемо аналіз деяких існуючих машин, конструкцій, а також ідей тим або іншим чином пересічених із завданнями, поставленими перед гомогенізатором, що розробляється.

Аналіз конструкцій проведемо у вигляді патентного і літературного огляду, в основу якого закладені принципи пошуку в пропонованих конструкціях позитивів, які можна було б використати в подальших розробках даного агрегату, і негативів, які необхідно по можливості уникати або ж зменшувати їхній прояв до мінімуму.

Проаналізуємо в послідовному порядку ряд роторних апаратів найбільш близьких по призначенню до гомогенізатора.

Розглянемо пристрій для гомогенізації [1], що включає корпус з розміщеними усередині перфорованими пластинами, який відрізняється тим, що пластини щільно притиснуті одна до одної, а перфорація виконана так, що у зборі утворюється один чи декілька рядів отворів, кожний з яких являє лабіринтний канал. Перевага полягає у низькій металоємності пристрою і високій якості готової продукції.

Сутність конструкції пояснюється кресленнями.

На рис.1 показана схема одного з варіантів пристрою для гомогенізації у розрізі. В корпусі 1 закріплена нижня підстава 2 і дві пластини 4, притиснуті за допомогою верхньої підстави 3 натискним пристроєм 6, що проходить через кришку 5.

На рис. 2 показана схема розміщення радіально розташованих отворів (наприклад, круглих) у пластинах 4. В обох пластинах 4 отвори зміщені так, що при накладенні пластин вони перекривають один одного й утворюють

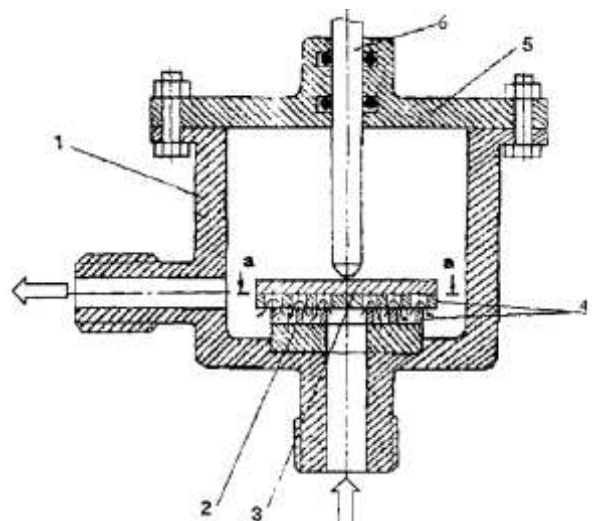


Рисунок 1. – Схема пристрою для гомогенізації у розрізі

суцільний лабіринтний канал з поперечним перерізом, який змінюється по довжині. Фіксація пластин 4 від взаємного переміщення по площині контакту здійснюється штифтами 7. На рис.2 показані чотири ряди отворів, число рядів визначається продуктивністю, мінімальне число рядів - один.

Розглянемо детальніше насос-гомогенізатор [2], що має корпус із вхідним і напірним патрубками, рухомий і нерухомий ротори, оснащені лопатками з прорізами, який відрізняється тим, що рухомий ротор складається з основного, покривного і лопатевого дисків, причому лопаті лопатевого диска мають криволінійну форму, а нерухомий ротор сполучений з корпусом, на внутрішніх стінках якого по обидві сторони лопатевого диска виконані прорізи, причому на всмоктувальній периферійній частині корпуса додатково встановлені лопатки, спрямовані по ходу обертання рухливого ротора. Виступи нерухомого ротора розташовані в шаховому порядку щодо прорізів лопатевого диска.

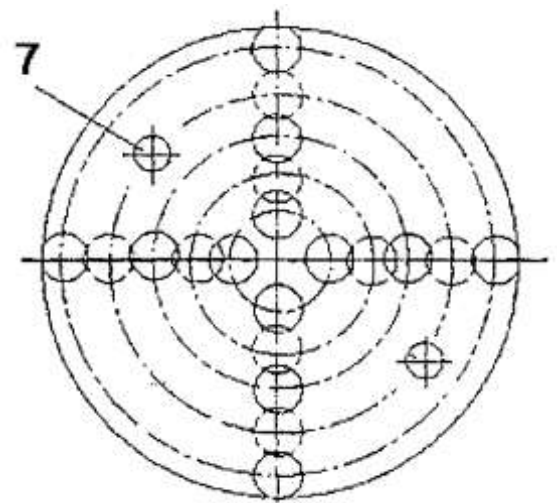


Рисунок 2. – Схема розміщення радіально розташованих отворів

Переваги даного пристрою:

- забезпечення руйнування жирових кульок (для рідких молочних продуктів), що в свою чергу збільшує термін зберігання продукту;
- поєднання двох операцій: перекачування та гомогенізація;
- низькі енерговитрати.

Розглянемо «Гомогенізатор суспензій», описаний в [3]. Цей винахід відноситься до хімічного машинобудування й може знайти застосування в апаратах для

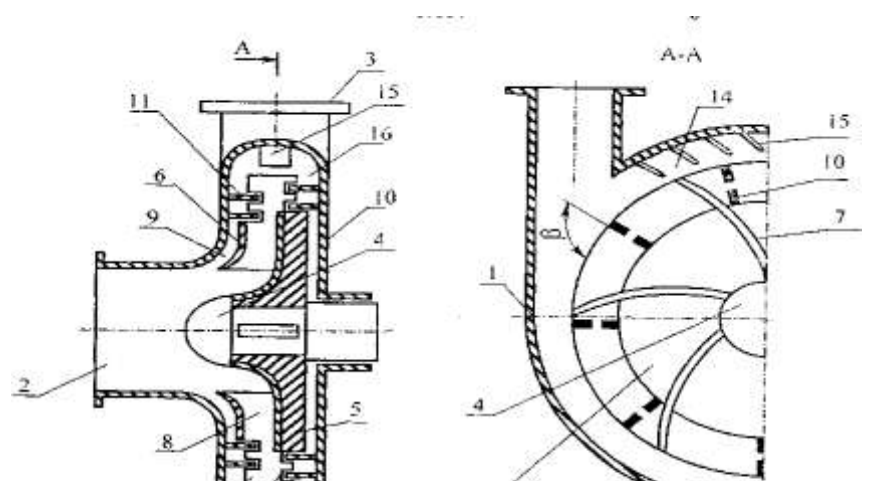


Рисунок 3. – Конструктивна схема насоса-гомогенізатора

одержання тонкодисперсних гомогенних суспензій та емульсій. В описі [3] наведено кілька модифікацій конструкції.

На рис.4 наведена базова конструкція винаходу.

Виділимо явні позитивні сторони конструкції:

- за рахунок форм робочих частин роторного 11 і статорного 13 коліс утворюються циркуляційні порожнини 21, у яких створюється пульсуючі закручені потоки, кавітаційне поле й поле відцентрових сил з великими градієнтами швидкості, тиску й температури. Ці фактори сприяють інтенсивному руйнуванню й перемішуванню компонентів робочого середовища;

- одночасно в полі відцентрових сил здійснюється класифікація диспергуючого робочого середовища по крупності й щільності: великі та більш щільні частки відкидаються до периферії на повторне диспергування;

- присутня і вторинна класифікація й диспергування часток у порожнині виходу 22;

- тиск у порожнині ротора й статора приблизно дорівнює тиску за ротором, що приводить до нечутливості апарата щодо зміни торцевого зазору, який можна регулювати;

- має місце термічна врівноваженість апарата: основні його вузли охолоджуються самим робочим середовищем.

Основним недоліком конструкції є можлива робота машини в умовах кавітації, що приведе до підвищеного зношування робочих деталей, а також відносна складність у виготовленні робочих органів.

Розглянемо «Багатокамерний млин» (рис.5), наведений в [4].

Звернемо увагу на плюси даної конструкції:

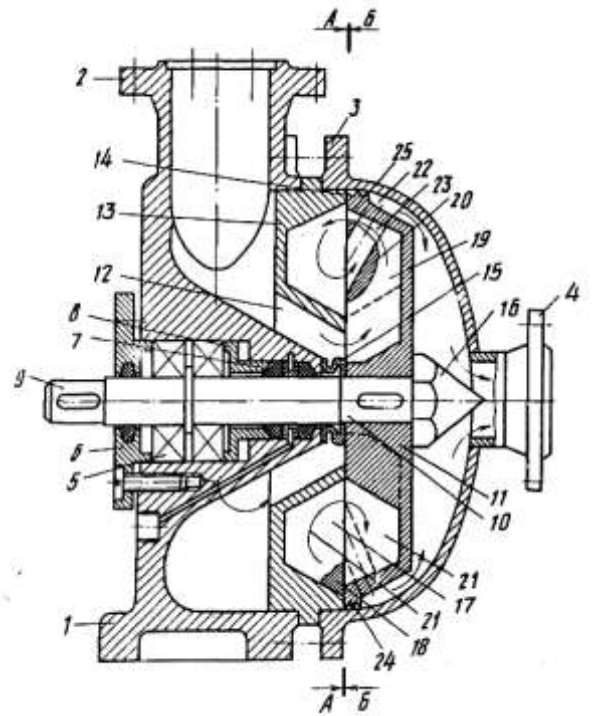


Рисунок 4. - Гомогенізатор суспензій

- багатоступеневість конструкції з можливістю набору необхідного числа щаблів, що дозволяє збільшити ступінь подрібнення, без збільшення питомих енерговитрат, підвищуючи тим самим ККД подрібнювача;
- відмінність першого щабля від наступних дозволяє забезпечити попереднє подрібнення матеріалу, уникаючи можливого «забивання»;
- створення першим щаблем великого вентиляційного ефекту, що забезпечує проходження матеріалу через всі камери;
- подрібнення матеріалу відбувається за рахунок зіткнення його часток між собою, у величезній кількості мікрозавихрень, створюваних пластинами пропонованою конструкцією.

До недоліків конструкції можна віднести:

- технологічна складність пропонованої конструкції робочих органів;
- можливість частої роботи машини при дисбалансі, пов'язаного з нерівномірним зношуванням пластин робочих органів.

Розглянемо конструкцію «Гомогенізатора» (рис.6.), наведену в [5].

Укажемо на переваги конструкції даної машини:

- багатоступінчасте подрібнення;
- отвори дисків статорів і роторів розташовані по протилежно спрямованих спіралях Архімеда, що забезпечує невеликий гідравлічний опір апарата, а також збільшує інтенсивність перемішування матеріалу;

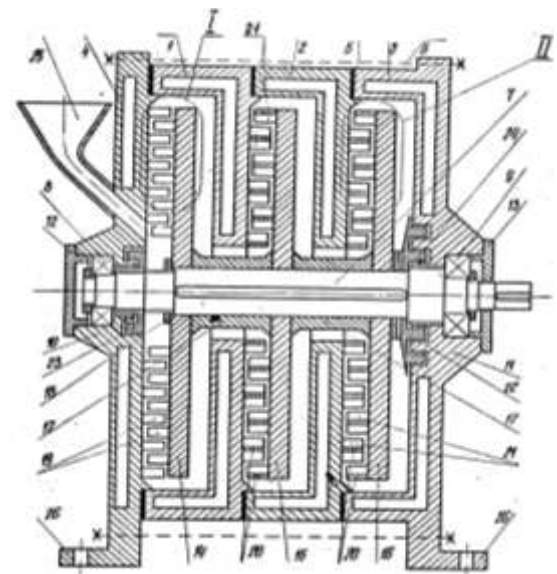


Рисунок 5. - Багатокамерний млин

- забезпечується однаковість складу вихідного продукту по об'єму;
  - визначено оптимальний крок спіралі Архімеда, складає 1,1 - 1,3 діаметра отвору.
- Недоліки конструкції виражені в:



- технологічній складності конструкції: складність забезпечення малого зазору між дисками статора й ротора;

- інтенсивне зношування ріжучих кромek отворів.

Розглянемо «Пристрій для гомогенізації пастоподібних матеріалів» (рис.7), описаний в джерелі [6].

Знайдемо переваги даної конструкції:

- на робочих поверхнях виконані канавки похилі до радіуса зі змінною глибиною й шириною, що дозволяє інтенсифікувати процес;

- канавки на робочих поверхнях корпуса й ротора протилежно спрямовані, що інтенсифікує процес подрібнення й перемішування;

- поступове збільшення ступеня подрібнення матеріалу;

- можливість регулювання тонкості дисперсності вихідного продукту;

- наявність у пристрої додаткової ділянки обробки за рахунок стирання продукту роликem 11;

- пристрій має сорочку для можливості охолодження конструкції.

Недоліки наведеної конструкції:

- складність конструкції;

- високе абразивне зношування;

- складність регулювання ступеня подрібнення матеріалу;

- низька надійність установки ролика.

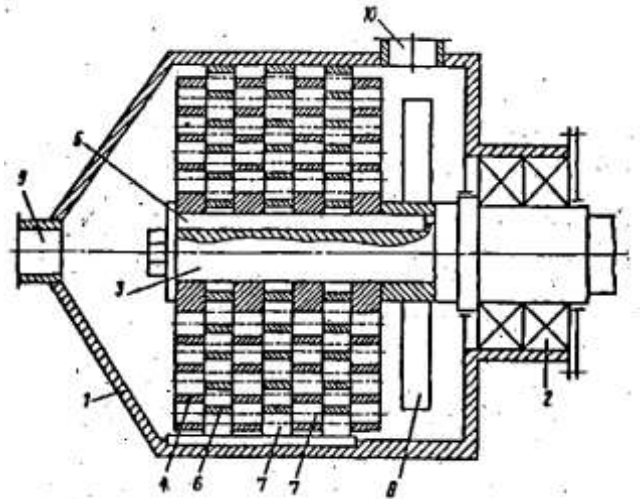


Рисунок 6. - Гомогенізатор

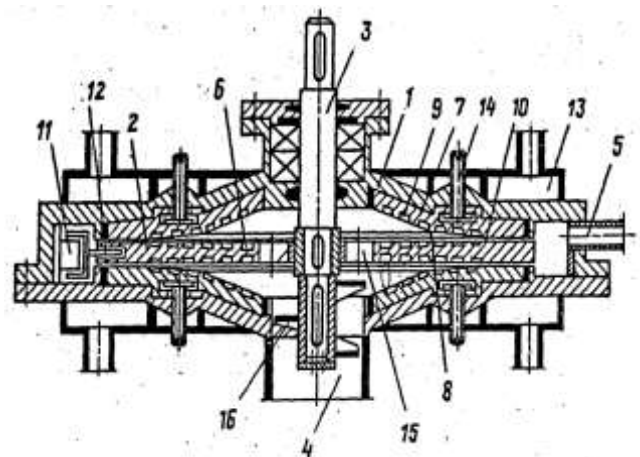


Рисунок 7. - Пристрій для гомогенізації пастоподібних матеріалів

Розглянемо блендер для сипучих і рідких середовищ рис.8

#### *Принцип роботи блендера*

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. 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.



*Рисунок 8. – Блендер*

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.



*Рисунок 9. – Плуножерний гомогенізатор*

Найбільше розповсюдження на сьогоднішній день набули плунжерні гомогенізатори рис.9

Його принцип роботи наступний. Гомогенізатор складається з плунжерного насосу 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 енергоємність, неможливість регулювання витрати робочого середовища.

## 1.2 Актуальність дослідження

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.



Рисунок 10. – Технологічна лінія Комаровського молочного заводу

Дана технологічна лінія (рис.10) 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 ємкості, 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.

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

- підвищення якості готового продукту можна досягнути за рахунок впровадження високоефективного 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.

### **1.3 Постановка задач дослідження**

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:

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

2) Створення дослідно-промислового зразка роторно-динамічного агрегату гомогенізатора.

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

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

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

#### **1.4 Вибір технічного об'єкту та методів проведення дослідження.**

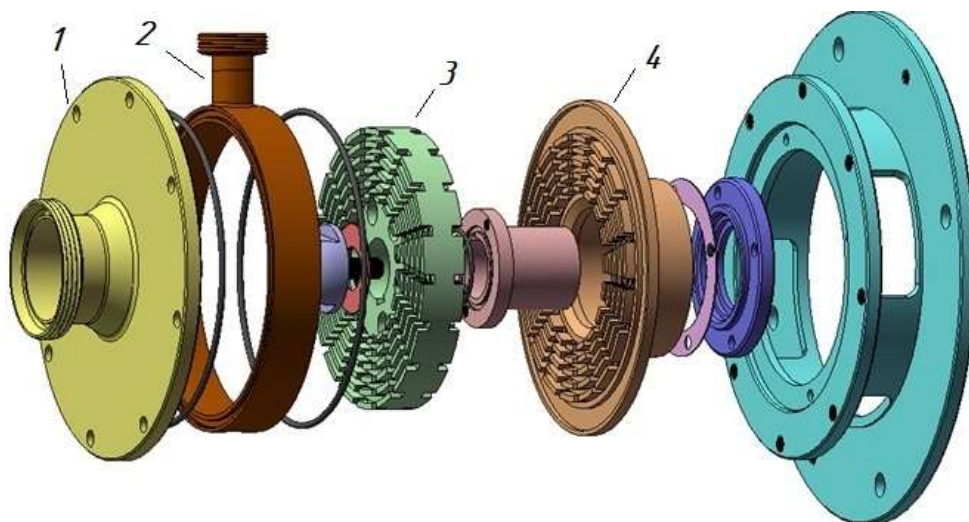
Об'єкт дослідження – робочий процес роторно-динамічного агрегата гомогенізатора.

Предмет дослідження – робота роторно-динамічного агрегата і гідро-динамічного принципу роботи на однофазних та багатофазних робочих середовищах.

У якості технічного об'єкту, що досліджувався, була обрана наступна конструктивна схема рис.11.

Основними елементами цієї конструктивної схеми є:

1) передній статор; 2) відвід; 3) робоче колесо; 4) задній статор.



*Рисунок 11. – Протічна частина гомогенізатора*

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

Задачі вирішувалися за допомогою наступних методів:

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

## **2. Вибір конструктивної схеми гомогенізатора та розрахунок енергетичних характеристик роторно-динамічного агрегату гомогенізатора для виробництва згущеного молока.**

### **2.1 Моделі розрахунку енергетичних характеристик**

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 [8] й беручи до уваги матеріали [7], [11] та [22]. 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 [8] 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 (20):

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

$Re_{\text{ц}}$  – 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  $Re_{\text{ц}}$  отримаємо наступним чином:

$$Re_{\text{ц}} = \frac{\rho n d^2}{\mu},$$

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 запропонована конструкція гомогенізатора є двохпоточною, то отримане значення сумарної потужності треба збільшити у два рази  $N_T = 2 \cdot N$ .

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 2.1. Отримані результати розрахунку зведемо до таблиці 2.2.

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

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

Критерій потужності згідно 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 2.1 – Сталі величини при розрахунку потужності гомогенізатора

Густи $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Частота в'язкості п, с.	Динаміч в'язкість $\mu$ , с	Лінійн розмір l, м	Висота орізі статора h, м	Величи зазору h, м	Витра Q, м <sup>3</sup> /с
998,2	50	0,001008	0,01	0,01	0,0003	0,002

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 2.2 – Розрахунок потужності гомогенізатора

Параметри ступені	Ступені									
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VI	IX	X
Зовнішній діаметр ротора $d$ , м	0,109	0,12	0,12	0,1	0,14	0,1	0,16	0,1	0,18	0,2
Ширина прорізів ротора $b_p$ , м	0,005	0,005	0,00	0,0	0,00	0,0	0,00	0,0	0,00	0,00
Ширина прорізів статора $b_c$ , м	0,005	0,005	0,00	0,0	0,00	0,0	0,00	0,0	0,00	0,00
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 $d \cdot 10^{-6}$	0,59	0,71	0,83	0,9	1,11	1,2	1,42	1,6	1,78	1,98
Критерій потужності $k_N$	3,15	2,53	2,1	1,7	1,47	1,2	1,08	0,9	0,82	0,71
Потужність $i$ -ї ступені $N_i$ , Вт	570	650	736	83	915	10	111	12	131	143
Потужність гомогенізатора $N$ , Вт	19611									

## 2.2 Конструктивна схема роторно-динамічного агрегата гомогенізатора.

Конструктивні схеми робочого колеса, ротора і статора наведені на рис.12 і рис.13.

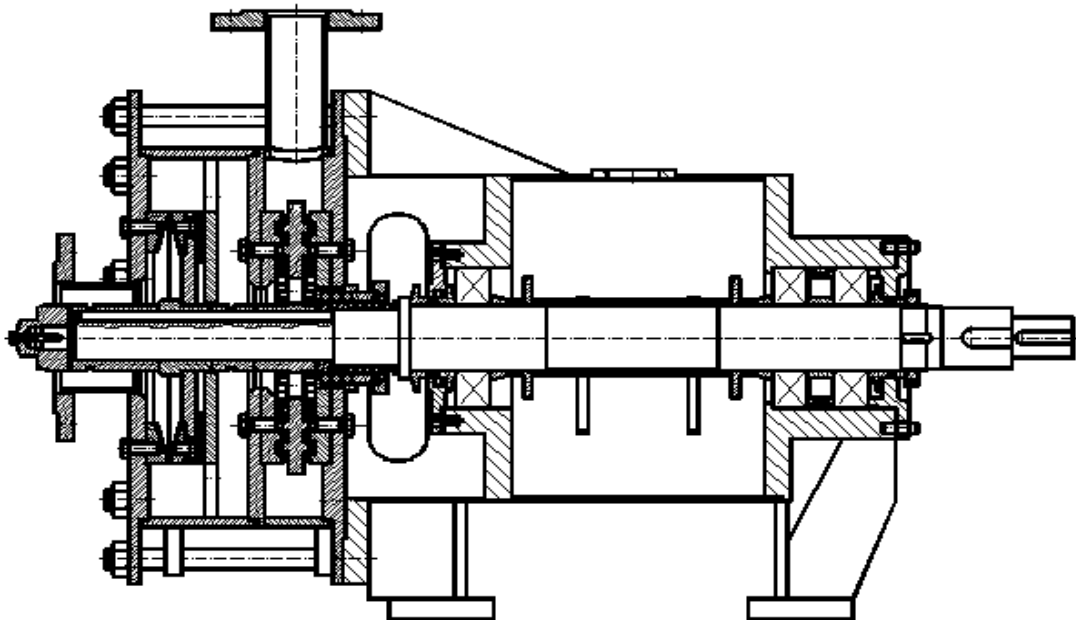


*Рис. 12 – Робоче колесо гомогенізатора*

*Рис.13–Ротор і статор гомогенізатора*

В основі гомогенізатора, що розробляється, лежить аналог впровадженого у технологію виробництва етилового спирту багатофункціонального 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.15) має деякі зміни у порівнянні з попередніми аналогами [21] 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 мало дисперсних частинок. Гомогенізатор складається з приводного асинхронного електродвигуна 1 (рис.15), до якого кріпиться проточна частина, виконана з нержавіючої сталі.



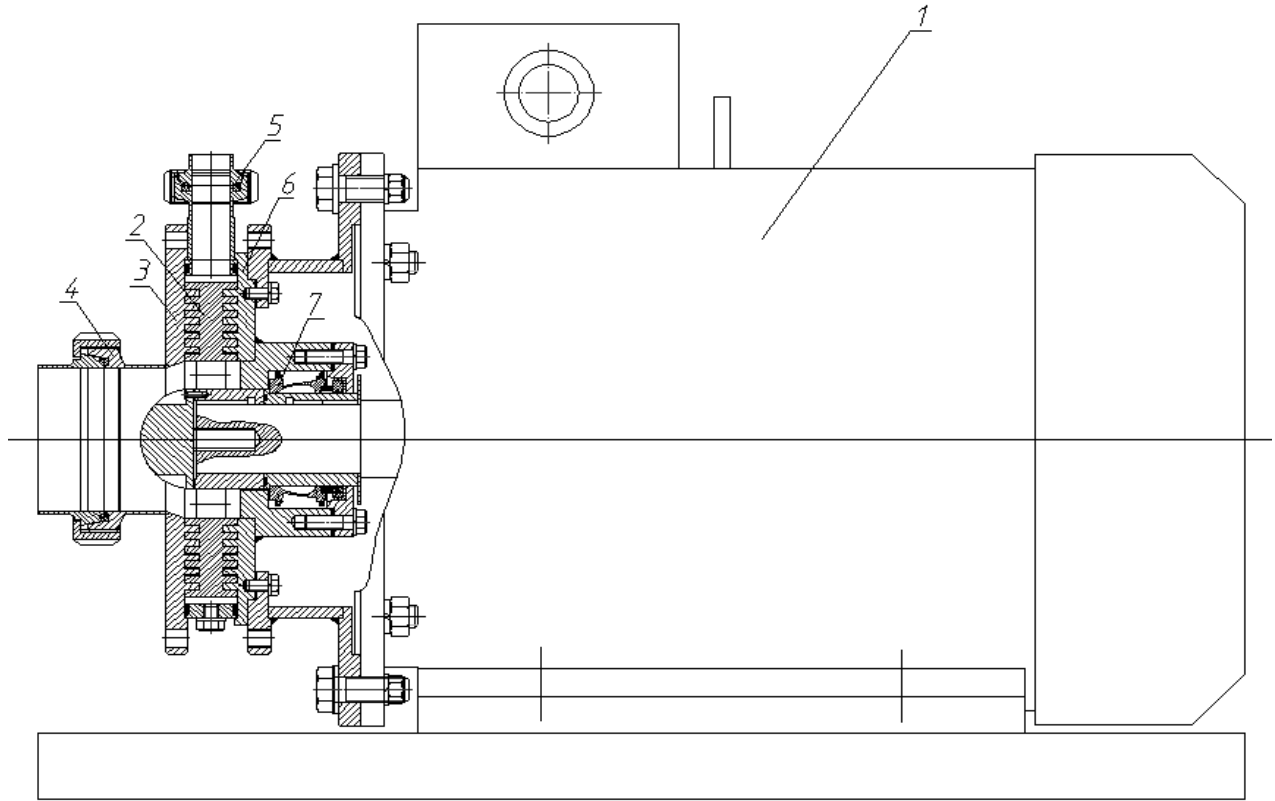
*Рисунок 14. – Загальний вигляд ТГА*

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<sup>0</sup>С. 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 ( $t=10\div 20$  °С) 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 15. – Проточна частина гомогенізатора*

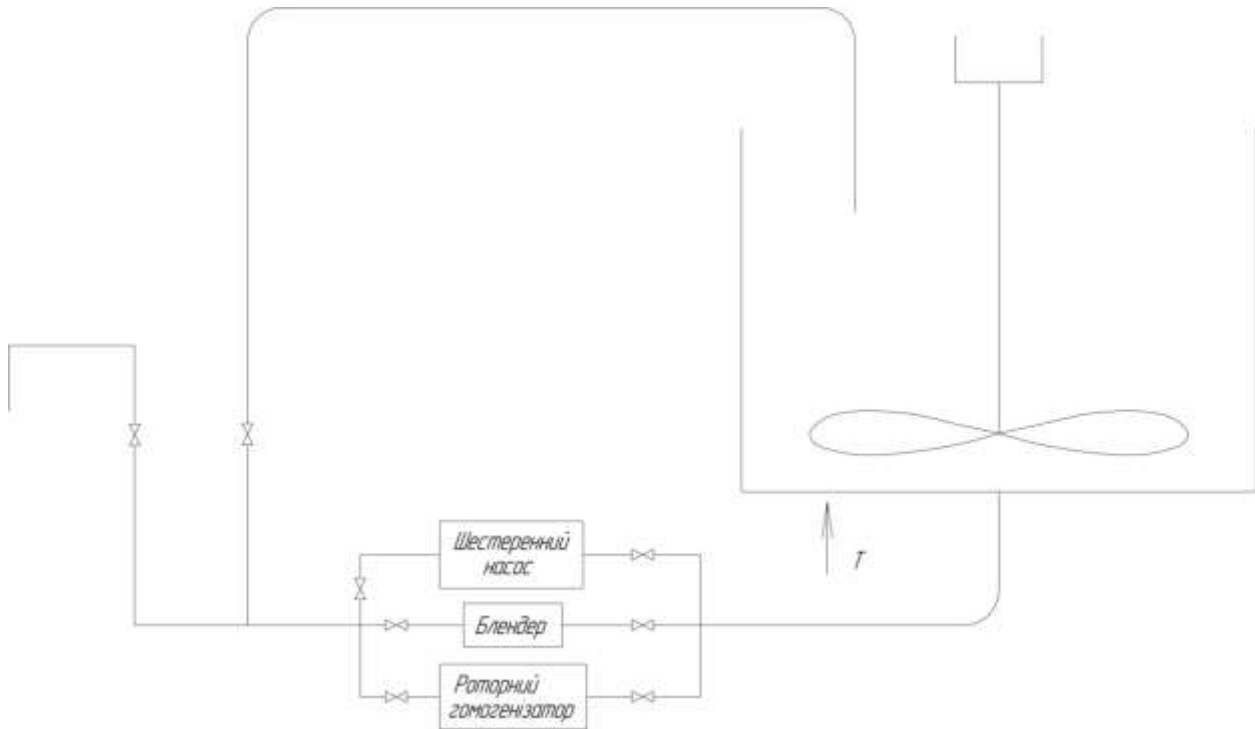
Основна відмінність гомогенізатора від існуючих роторно-пульсаційних апаратів полягає в наступному:

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.

### **2.3 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 (рис.16).



*Рисунок 16. – Конструктивна схема технологічної лінії з використанням роторно-динамічного агрегата-гомогенізатора.*



*Рисунок 17. – 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.

#### 2.4 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 узамовника.

За таких умов на кафедрі прикладної гідроаеромеханіки СумДУ було розроблено стенд (рис. 18).

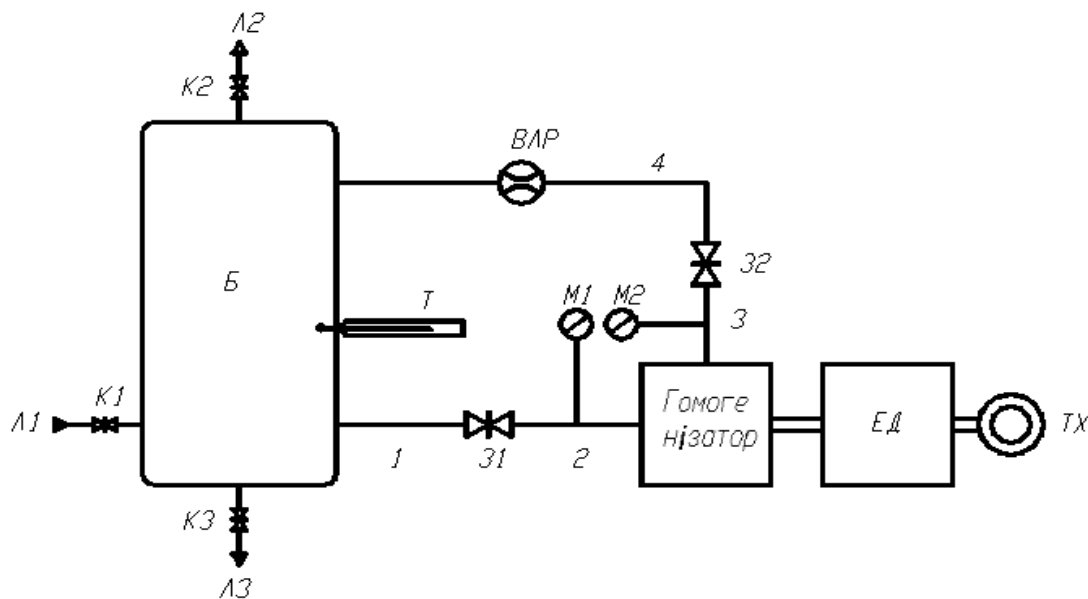


Рисунок 18. – Принципова схема стенду для дослідження насосного ефекту гомогенізатора

Таблиця 2.3 – Умовні позначення принципової схеми стенду (до рис.15)

Умовне начення	Назва	Кількість	Примітка
ЕД	Асинхронний ктродвигун	1	
ТХ	Тахометр	1	
Т	Термометр	1	
Б	Бак	1	V=5 м <sup>3</sup>

Умовне начення	Назва	Кількість	Примітка
K1, K2, K3	Кран шаровий	3	
31, 32	Засувка	2	
ВЛР	Витратомір	1	
M1, M2	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 бопроводу	2	D <sub>y</sub> 100
3	Напірна ділянка бопроводу	1	D <sub>y</sub> 100
4	Напірна ділянка бопроводу	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 50м. До основного обладнання входять: бак ємністю 5 м<sup>3</sup>, агрегат гомогенізатора з асинхронним двигуном 4A160S2Y3 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 [24]. До складу комплекту 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%.



На рис.19 наведені експериментальні дані дослідження насосної та енергетичної характеристик роторнодинамічного агрегату-гомогенізатора з робочими колесами різного діаметру (характеристики позначені пунктиром 260мм, 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.

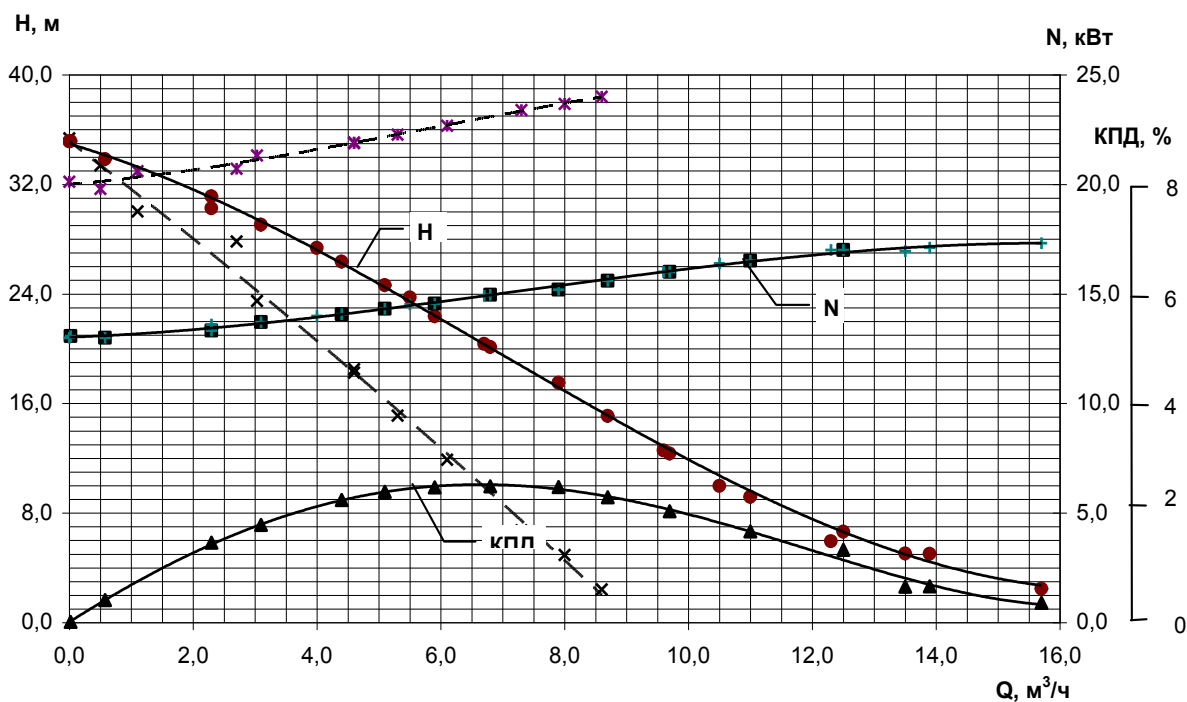


Рисунок 19. – Результати експериментального дослідження енергетичної та насосної характеристик агрегату

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.20.

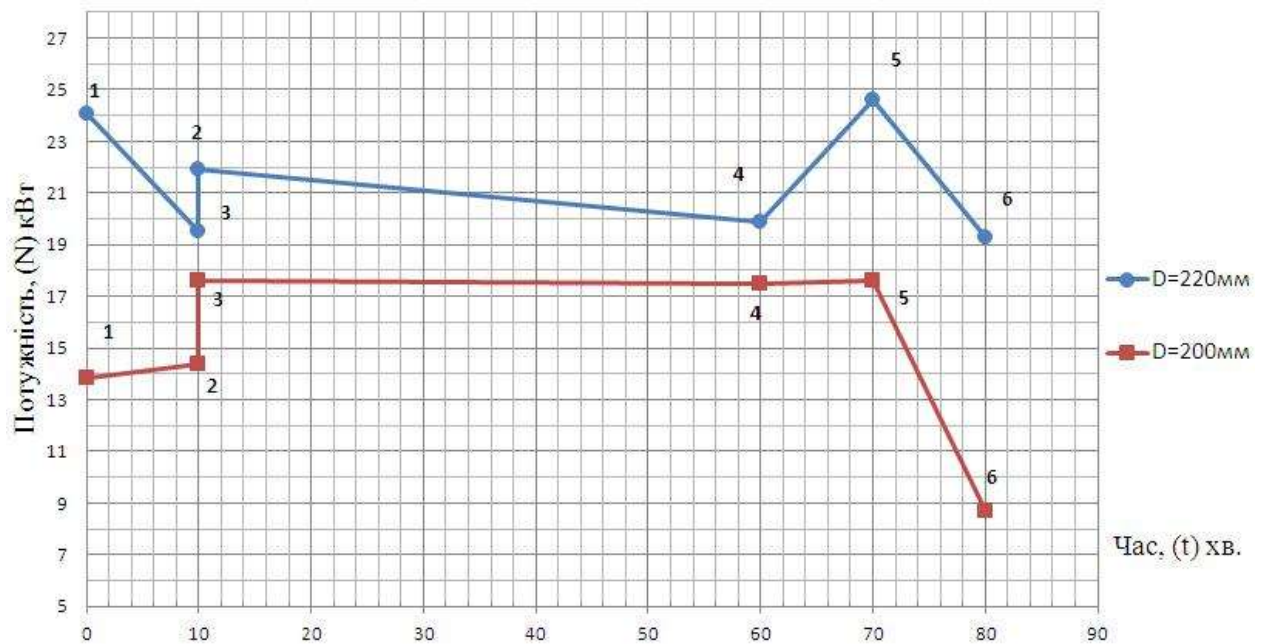


Рисунок 20. – Графіки експериментальних досліджень

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, ароматизаторів;

точка 5-6 – фасовка.

## **Висновок**

В зв'язку з необхідністю вдосконалення технологічного процесу виробництва згущеного молока нами був проведений детальний аналіз відомих конструкцій, які використовуються для інтенсифікації даного процесу. Після всебічного розгляду численного ряду роторних апаратів, враховуючи виділені позитивні та негативні сторони кожного з них, нашу увагу привернув гідравлічний млин, призначений для спиртової галузі промисловості, а саме його друга ступень, яка була закладена в основу розробки нашого агрегату.

Згідно використаних джерел був проведений розрахунок енергетичних параметрів машини, зокрема споживаної потужності на кожній ступені та агрегату в цілому, який дав змогу оцінити ефективність конструкції проточної частини агрегату, оптимальність вибору геометричних розмірів прорізів ротора й статора та зазорів між ними. Унікальність конструкції полягає у різній кількості прорізів на робочих поверхнях, що кардинально змінює принцип дії агрегату та наявність турбулізуючих елементів у вигляді канавок, які впливають на ефективність гомогенізації середовища. При подальшій розробці та модернізації даної машини планується проведення досліджень щодо розмірів і форми канавок, їх вплив на енергетичну характеристику та якість вихідного продукту.

Розробленому агрегату притаманний насосний ефект, що, крім ретельного диспергування і підігріву робочого середовища, дозволяє подавати оброблюваний продукт з необхідним напором і витратами до наступної стадії технологічного процесу, якщо це необхідно для даних умов виробництва. Для детального вивчення властивого машині ефекту найближчим часом планується проведення ряду експериментальних досліджень на спеціально розроблених стендах лабораторії кафедри прикладної гідроаеромеханіки СумДУ.

## Список використаних джерел

1. Патент ЕВП 0285725, А2, МКИ В01F5/06, Опубл. Bulletin 88/41. – 12.10.88.
2. Патент № 2002076305, кл. А01J11/16. – 16.06.2003.
3. Авторское свидетельство № 1535609, кл. В 01 F 7/04, 1990.
4. Авторское свидетельство № 980823, кл. В 02 С 7/00, кл. В 02 С 19/00, 1982.
5. Авторское свидетельство № 1494956, кл. В 01 F 7/10, 1989.
6. Авторское свидетельство № 1299615, кл. В 01 F 7/26, 1987.
7. О.А. Кокушкин, А.А. Барам, и И.С. Павлушенко. О расчете мощности ротационных аппаратов. Химическое машиностроение. 1969. №8.
8. Барам А.А., Дерко П.П., Клоцунг Б.А. Расчет мощности аппаратов роторно-пульсационного типа // Химическое и нефтяное машиностроение. 1978. №4. С. 5-6.
9. Дерко П.П., Барам А.А., Коган В.Б. и др. О гидромеханических закономерностях работы роторно-пульсационных аппаратов. // ТОХТ 1973. Т.7, №1. С. 123-125.
10. Балабудкин М.А. Роторно-пульсационные аппараты в химико-фармацевтической промышленности. М.: Медицина, 1983. 160 с.
11. Богданов В.В., Христофоров Е.И., Клоцунг Б.А. Эффективные малообъемные системы. Л.: Химия. 1989. 244 с.
12. Иванец Г.Е., Плотников В.А., Плотников П.В. Энергетическая характеристика роторно-пульсационного аппарата // ЖПХ 2000. Т.73. вып. 9. С. 1511-1514.
13. Промтов М.А. Пульсационные аппараты роторного типа. Теория и практика. М.: Машиностроение. 2001. 260 с.
14. Балабышко А.М., Юдаев В.Ф. Роторные аппараты с модуляцией потока их применение в промышленности. М.: Недра. 1982. 176 с.
15. Червяков В.М., Галаев В.И., Коптев А.А. Нестационарное течение жидкости в зазоре между ротором и статором роторного аппарата // Вестник ТГТУ. 2003. Т9, №4. С. 646-652.

16. Волк А.М. Течение вязкой жидкости в пространстве между движущимися проницаемыми поверхностями // ИФЖ. 1993. Т. 65, №2. С. 152-158.
17. Karman Th. Uber laminare und turbulente Reibung // Zamme. 1921. В. 1. S. 233-352.
18. Koptev A.A. Die Flussigkeitsstromung in den zentrifugalfeldern unter Wirkung der sich drehenden Scheiben. Problem von Th. Karman // Transaction of TSTU. 1995. V.1. №1-2. S. 65-74.
19. Исследование гидродинамических и акустических характеристик аппаратов с роторно-пульсационными устройствами. – «Химическое и нефтяное машиностроение». 1969, №11. С. 11-14. Авт.: А.А. Барам, П.П.Дерко, В.Б.Коган и др.
20. Стренк Ф. Перемешивающие аппараты с мешалками. М. – Л. «Химия», 1975. 322 с.
21. Євтушенко А.О., Ковальов С.Ф., Папченко А.А. Теплогенеруючі агрегати – подальші шляхи їх розвитку та удосконалення // Международный научно-технический журнал "Проблемы машиностроения". – Харьков, 2007, том 10. – С. 48 – 52.
22. В.М. Червяков, А.А. Коптев. Определение энергозатрат в роторных аппаратах. Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2005. №4. С. 10-12.
23. Анурьев В.И. Справочник конструктора-машиностроителя: В 3-х т. Т. 3. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1980. – 557 с., ил.
24. ГОСТ 6134-87. Насосы динамические, методы испытаний. - Введ.01.01.89. - М.: Изд-во стандартов, 1988. - 29 с.
25. Яременко О.В. Испытания насосов. Справочное пособие. - М.: Машиностроение, 1976. - 225 с.
26. Спиридонов А.А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов. М: Машиностроение, 1981. – 184 с., ил.
27. Рузинов Л.П., Слободчикова Р.И. Планирование эксперимента в химии и химической технологии. – М., Химия, 1980. – (серия «Химическая кибернетика») – 280 с., ил.