

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
Факультет біотехнології та біотехніки
Кафедра біотехніки та інженерії**

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

Мельник В.М.

(підпис)

“ ____ ” _____ 2025 р.

Дипломний проєкт

На здобуття ступеня бакалавра

Зі спеціальності 133 Галузеве машинобудування

На тему: «Очищення побутових стічних вод з розробкою метантенку»

Виконав:

Студент 4 курсу, групи БІ-11

Гераскін Назар Русланович

(підпис)

Керівник:

Асистент, Інженер провідний

каф. Біотехніки та інженерії Косова В.П.

(підпис)

Рецензент:

Асистент кафедри промислової

біотехнології та фармації Піць В.В.

(підпис)

Засвідчую, що у цьому
дипломному проєкті немає
запозичень з праць інших
авторів без відповідних
посилань.

Студент _____
(підпис)

Київ – 2025 року

**Пояснювальна записка
до дипломного проєкту**

на тему: «Метантенк лінії очищення стічних
вод та активного мулу»

Київ – 2025 року

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Факультет/ННІ біотехнології та біотехніки

Кафедра біотехніки та інженерії

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність Обладнання фармацевтичних та біотехнологічних виробництв

Освітньо-професійна програма Бакалавр

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Мельник В.М.

«___» _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ

на дипломний проєкт/дипломну роботу студенту

Гераскіну Назару Руслановичу

1. Тема проєкту/роботи очищення побутових стічних вод з розробкою метантенку
керівник проєкту/роботи Косова Віра Петрівна
затверджені наказом по університету від «29» 05 2025 р. №1838-С
2. Строк подання студентом проєкту/роботи _____
3. Вихідні дані до проєкту/роботи Тиск в метантенку 0,2 МПа,
температура робочого середовища в метантенку 38 °С, температура
охолоджуючої води
4. Зміст (дипломної роботи) пояснювальної записки (перелік завдань, які потрібно розробити) призначення та область застосування, опис технологічного процесу,
призначення та область застосування метантенку, патентний пошук, технічна
характеристика апарату, обґрунтування вибору конструкції, вибір матеріалів,
розрахунки, що підтверджують працездатність та надійність конструкції,
рекомендації з монтажу і експлуатації, охорона праці, вибухо- і
пожежонебезпеки.
5. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо) Апаратурно-технологічна схема лінії
очищення побутових стічних вод (А1); Метантенк. Складальне креслення (А1);
Корпус. Складальне креслення (А1); Теплообмінник. Складальне креслення (А3);
Опори. Складальне креслення (А3);

6. Консультанти розділів проєкту (роботи)

Дата видачі завдання _____

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проєкту/роботи	Строк виконання етапів проєкту/роботи	Примітка
1	Призначення та область застосування установки. Опис технологічного процесу очищення стічних вод	19.05-23.05	
2	Обґрунтування вибору обраної конструкції	26.05-28.05	
3	Апаратурно-технологічна схема лінії очищення	28.05-31.06	
4	Розрахунки що підтверджують працездатність та надійність конструкції	01.06-05.06	
5	Складальне креслення метантенку	05.06-08.06	
6	Оформлення пояснювальної записки	09.06-14.06	

Студент _____
 Керівник проєкту _____

Назар Гераскін
 Віра Косова

Реферат

Дипломний робота освітньо-кваліфікаційного рівня «бакалавр» на тему: «Очищення побутових стічних вод з розробкою метантенку»/НТУУ «КПІ імені І. Сікорського»; Керівник Косова Віра Петрівна, виконавець Гераскін Назар Русланович.

Робота складається з переліку умовних позначень, вступу, дев'яти розділів, висновку, переліку посилань та додатків. Повний обсяг роботи становить 82 сторінки, 9 рисунків, 1 таблиці і переліку посилань з 29 найменувань.

Мета проєкту – вивчення методу очищення побутових стічних вод та стабілізації активного мулу шляхом анаеробного зброджування; створення апаратного оформлення процесу утилізації органічних речовин і одержання біогазу як вторинного енергетичного ресурсу.

Методи дослідження – методи дослідження процесу очистки побутових стічних вод, вивчення особливостей конструкції метантенку, розрахунків та проектування метантенку для отримання заданих кінцевих продуктів з відповідними характеристики.

Результати роботи та їхня новизна: описано процес очистки побутових стічних вод, розроблено апаратну схему лінії; досліджено процес продукування біогазу при метаболізмі концентрованих субстратів в результаті метанового зброджування; розраховано параметри метантенку;

На основі проведених розрахунків спроектовано метантенк для очистки побутових стічних вод та стабілізації активного мулу шляхом анаеробного зброджування.

МЕТАНТЕНК, АНАЕРОБНЕ ЗБРОДЖУВАННЯ, ПРОДУКУВАННЯ БІОГАЗУ.

Abstract

Bachelor's qualification work on the topic: "Treatment of domestic wastewater with the development of a methane tank" / National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"; Supervisor: Vira Petrivna Kosova; Author: Nazar Ruslanovych Heraskin.

The work includes a list of abbreviations, an introduction, nine chapters, conclusions, a list of references, and appendices. The total volume of the thesis is 82 pages, containing 9 figures, 1 table, and a list of 29 references.

The aim of the project is to study the method of domestic wastewater treatment and stabilization of activated sludge through anaerobic digestion; to design a process unit for the conversion of organic matter and the production of biogas as a secondary energy resource.

Methods of research include the study of domestic wastewater treatment processes, analysis of methane tank design features, and engineering calculations to develop a methane tank capable of producing target outputs with specified parameters.

Research results and novelty: the process of domestic wastewater treatment is described; the technological scheme of the treatment line is developed; the process of biogas production from the metabolism of concentrated substrates through methanogenic fermentation is analyzed; and the structural and thermal parameters of the methane tank are calculated.

Based on the performed calculations, a methane tank was designed for the treatment of domestic wastewater and stabilization of activated sludge through anaerobic digestion.

METHANE TANK, ANAEROBIC DIGESTION, BIOGAS PRODUCTION

Зміст

Перелік скорочень, умовних позначень та термінів	8
Вступ.....	10
1. Призначення та область застосування	12
1.2 Характеристика активного мулу	13
2. Опис технологічного процесу лінії очищення стічних вод та активного мулу з використанням метантенка	16
3. Призначення та область застосування метантенку.....	19
3.1 Обґрунтування вибору метантенку.....	20
4. Патентний пошук	26
5. Технічна характеристика апарату	27
6. Обґрунтування вибору конструкції, опис конструкції апарату, вибір матеріалів	28
6.1. Вибір матеріалів для виготовлення.....	28
6.2 Опис конструкції, основних компонентуючих одиниць та деталей	29
7. Розрахунки, що підтверджують працездатність та надійність конструкції .	30
7.1 Матеріальний баланс	30
7.2 Тепловий розрахунок.....	37
7.3 Розрахунок теплової ізоляції	55
7.4 Вибір основних параметрів апарату.....	56
7.5 Розрахунок циліндричної обичайки.....	57
7.6 Розрахунок еліптичного днища	61
7.7 Розрахунок вала.....	64
7.8 Розрахунок опор апарату.....	68
8. Рекомендації з монтажу і експлуатації.....	71
9. Охорона праці	73
9.1 Вибухо- і пожежонебезпека	75
Висновки	77

Б/11.03.61033.000-40 ПЗ

					Очищення побутових стічних вод з розробкою метантенку			Літ.		Маса	Масштаб
Змн.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата						1	1 : 1
Розроб.		Гераскін Н. Р.						Арк.	4	Аркушів	81
Перевір.		Косова В.П.									
Т. Контр.											
Реценз.											
Н. Контр.											
Затверд.								ФБТ, НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського»			

Перелік скорочень, умовних позначень та термінів

V – об'єм, м^3 ;

W – масова витрата води, кг/с ;

Q – продуктивність, $\text{м}^3/\text{доб}$;

D – доза завантаження осаду, %;

P, p – тиск, Па ;

N – потужність, Вт ;

t, T – температура, $^{\circ}\text{C}$;

a – концентрація, % (масс);

c – теплоємність, $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$;

λ – коефіцієнт теплопровідності, $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{K})$;

τ – час, с ;

ω – швидкість, м/с ;

ρ – густина, $\text{кг}/\text{м}^3$;

μ – динамічний коефіцієнт в'язкості, $\text{Па}\cdot\text{с}$;

C – концентація, мг/л ;

α – коефіцієнт тепловіддачі, $\text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{K})$;

K – коефіцієнт теплопередачі, $\text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{K})$;

M, m – маса, кг ;

σ – напруження матеріалу, $\text{Н}/\text{м}^2$;

F – площа, м^2 ;

D, d – діаметр, м ;

					Б/11.03.61033.000-40 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

H, h – висота, м;

L, l – довжина, м;

S, δ – товщина, м;

Re – критерій Рейнольдса;

Nu – критерій Нуссельта;

Pr – критерій Прандтля;

Активний мул — це складна біологічна система, що утворюється у процесі біологічного очищення стічних вод і складається з мікроорганізмів, пов'язаних у вигляді зооглеєвих утворень. Ці мікроорганізми існують у формі пластівців, які включають бактерії, грибки, водорості, найпростіших, а також неорганічні частинки. Вони вступають у трофічну взаємодію, забезпечуючи послідовне перетворення органічних забруднень. Активний мул виконує роль біологічного фільтра, адсорбуючи забруднення з рідини, і бере участь у розкладі органіки за рахунок ферментативної активності. Його ефективність визначається складом біоценозу, гідродинамічними умовами та типом очисної споруди.

Біогаз — це суміш газоподібних продуктів, що утворюються внаслідок анаеробного зброджування органічної сировини, зокрема осадів стічних вод, гною або органічних залишків. Основними компонентами біогазу є метан (CH_4) та вуглекислий газ (CO_2), у меншій кількості присутні сірководень (H_2S), водень, аміак та водяна пара. Його теплотворна здатність залежить від частки метану та може досягати 20–25 МДж/м³. Біогаз є альтернативним джерелом енергії, що дозволяє скоротити споживання викопного палива і використовується для генерації тепла, електроенергії або як паливо після очищення.

					Б/11.03.61033.000-40 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Вступ

Однією з найактуальніших проблем сучасності є пошук ефективних технологій переробки органічних відходів, а саме активного мулу та стічних вод, із залученням біотехнологічних методів. У контексті енергетичної незалежності та екологічної безпеки все більшого значення набувають системи анаеробного зброджування, серед яких ключову роль відіграє метантенк — реактор, у якому за участю метаноутворювальних мікроорганізмів відбувається перетворення органічної речовини на біогаз. Такий підхід дозволяє одночасно вирішувати питання енергоефективності, переробки відходів і охорони довкілля.

Україна є країною з високим сільськогосподарським та комунальним потенціалом, накопичує значні обсяги органічних відходів, проте в умовах обмежених фінансових і енергетичних ресурсів недостатньо реалізованим залишається потенціал біогазових установок. У даний час, коли країни Європейського Союзу (зокрема Німеччина, Данія та Австрія) вже досягли значного прогресу в індустріалізації виробництва біогазу, в Україні на рівні промислової інфраструктури спостерігається лише поодинокі впровадження установок метанового бродіння, здебільшого експериментального рівня [1].

Проведений патентний і літературний аналіз свідчить про те, що вирішальними технічними проблемами сучасних метантенків є утворення застійних зон, нерівномірне перемішування біомаси, недостатня термоізоляція корпусів та накопичення мінерального осаду в реакторі. Наприклад, при відсутності перемішування біомаси в реакторі швидко формується поділ шарів через флотацію і гравітаційне осідання, що значно знижує ефективність контакту мікроорганізмів з субстратом. Зважаючи на це, модернізація існуючих апаратів, спрямована на забезпечення стабільного гідродинамічного режиму, контроль температури та підвищення теплообміну є надзвичайно актуальною.

					Б/11.03.61033.000-40 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

У бакалаврському проєкті визначається розробка горизонтального метантенку з механічною системою перемішування і секційними теплообмінниками. Це дозволяє забезпечити стабільний температурний режим ($\approx 38^\circ\text{C}$), оптимальні умови для метаногенезу та зменшення часу утримання субстрату в реакторі. Конструкція апарата адаптована до умов мезофільного бродіння з ефективною утилізацією біогазу для потреб опалення й нагріву теплоносія. Такий підхід відповідає сучасним вимогам до екологічної безпеки, енергетичної автономності та утилізації надлишкового активного мулу з очисних споруд [2].

Сфера застосування запропонованої розробки охоплює очисні споруди міського й промислового типу, комунальні біогазові комплекси, аграрні підприємства, харчову промисловість, а також локальні системи утилізації органічних стоків у рамках концепції циркулярної економіки. Особливо перспективним є використання подібних установок у муніципальних системах з централізованим збором стічних вод, де стабільна робота метантенків дозволяє скоротити обсяг шкідливих викидів, отримувати високоякісні органічні добрива та альтернативне джерело теплової енергії [1,2].

Отже, запропонована конструкція метантенку не лише відповідає поточному рівню розвитку галузі, а й дозволяє вирішити низку прикладних технічних, економічних і екологічних завдань. У рамках проєкту передбачено обґрунтування вибору типу конструкції, проведення теплотехнічних та міцнісних розрахунків, аналіз гідродинаміки і мікробіологічних процесів, а також визначення енергоекономічної ефективності реалізації запропонованої установки.

					Б/11.03.61033.000-40 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1. Призначення та область застосування

Метантенк є головним елементом у технологічній лінії біологічного очищення стічних вод та переробки надлишкового активного мулу. Його основне призначення полягає в анаеробній стабілізації осадів, які надходять із первинних і вторинних відстійників, з метою зниження обсягу мулової маси, знешкодження органічних речовин та отримання супутнього продукту — біогазу. Такі установки широко впроваджуються на комунальних очисних спорудах, де ефективно знезараження осаду відіграє критичну роль у забезпеченні екологічної безпеки систем водовідведення [3].

На відміну від аеробних методів, анаеробна стабілізація в метантенках забезпечує значно нижчий приріст біомаси та дозволяє уникнути енерговитрат на аерацію. При цьому рівень зменшення органічної речовини може досягати 40–60 %, а вихід біогазу становить близько 0,8–1 м³ на 1 кг сухої органічної речовини. Це створює можливості для часткового або повного енергетичного забезпечення самої станції очищення, особливо в умовах правильного проєктування системи теплоутилізації [4].

Метантенки забезпечують створення оптимальних умов для діяльності мікроорганізмів активного мулу. У їх робочому об'ємі реалізується повний цикл метанового зброджування: від гідролізу великих органічних молекул, через утворення летких жирних кислот, до остаточного перетворення їх у метан і вуглекислий газ. У рамках одного апарата протікає як кислотогенна, так і метаногенна фаза, що дозволяє уникати необхідності додаткових технологічних об'єктів для роздільного зброджування [1].

Сучасні метантенки можуть мати різну конструкцію: вертикальну або горизонтальну, із змішуванням, теплообміном та газовим контролем. Завдяки автоматизованій системі управління, що включає датчики температури, тиску, рівня та витрати, забезпечується стабільність умов ферментації та безперебійна робота апарата. Температурний режим обирається залежно від кліматичних умов та типу субстрату. Найпоширенішим є мезофільний режим

					Б/11.03.61033.000-40 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

у діапазоні 35–38 °С, який дозволяє досягти балансу між швидкістю бродіння та енергетичними витратами [4].

Метантенки знайшли широке застосування не лише на очисних спорудах, а й у харчовій, переробній промисловості та на аграрних підприємствах, де є постійні надходження органічно забруднених стоків. Їх використання дозволяє мінімізувати обсяги мулу, зменшити вміст патогенних організмів у кінцевому осаді, а також виробляти біогаз, що може бути використаний на місці — наприклад, для підігріву самих метантенків або в когенераційних установках [5].

Таким чином, метантенк є універсальним і стратегічно важливим апаратом у системах біологічного очищення стічних вод, який поєднує функції стабілізації, знезараження, енерговідновлення та підготовки до подальшої утилізації осаду. Його застосування цілком відповідає сучасним вимогам до екологічної безпеки, енергоефективності та раціонального поводження з відходами у водному господарстві.

1.2 Характеристика активного мулу

Активний мул є важливою біологічною складовою процесу очищення стічних вод, як от в анаеробних умовах, які реалізуються в метантенках. Цей комплекс мікроорганізмів бере безпосередню участь у біохімічному перетворенні органічних забруднень на стабільні кінцеві продукти, включаючи біогаз, головним компонентом якого є метан. В умовах відсутності кисню анаеробні мікроорганізми активного мулу здійснюють багатоступінчасту деградацію органічних сполук, які надходять у метантенк разом зі стічними водами та осадами.

У структурі активного мулу переважають мікроорганізми, які функціонують у формі біоорганомінерального комплексу, представленого зооглеями — симбіотичними колоніями, покритими загальною слизовою оболонкою. Частини активного мулу складаються на 70 % із живих клітин та на 30 % — з неорганічних включень. Основу таких мікроколоній становлять

					Б/11.03.61033.000-40 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

бактерії, які мають здатність до гідролізу, ацидогенезу, ацетогенезу та метаногенезу — чотирьох основних фаз метанового зброджування [1].

Метантенки як герметичні біореактори, створюють сприятливі умови для розвитку анаеробного біоценозу активного мулу. В таких спорудах забезпечується належна температура, гідравлічний режим і тривалість утримування субстрату, що є критичними факторами для стабільної діяльності метаноутворюючих бактерій. Дослідження підтверджують, що саме активний мул, зокрема його гранульована форма, дозволяє суттєво підвищити ефективність очищення завдяки високій концентрації біомаси і її здатності до седиментації. Анаеробний активний мул характеризується низьким приростом біомаси, що зменшує потребу в додатковому зневодненні, та високою метаногенною активністю, яка досягає 1–2,5 кг ХСК/кг СР на добу.

Мікроорганізми, які входять до складу активного мулу, належать до різних таксономічних груп – це бактерії родів *Pseudomonas*, *Methanosarcina*, *Methanosaeta*, *Clostridium* та інші. Вони виконують спеціалізовані функції на кожному етапі ферментації, зокрема гідролізу полімерних сполук, утворення летких жирних кислот, перетворення ацетату і водню в метан. Умови в метантенках формують унікальні біоценози, де домінують саме метаногени, які здатні ефективно працювати в температурному діапазоні 30–55 °С, залежно від обраного технологічного режиму — мезофільного або термофільного [2].

Наявність активного мулу в метантенку значно підвищує якість очищення висококонцентрованих господарсько-побутових і промислових стічних вод, де концентрація органічних забруднень часто перевищує 2000 мг О₂/дм³. Завдяки участі активного мулу відбувається не лише видалення забруднень, а й виробництво цінного ресурсу — біогазу, що дозволяє реалізувати концепцію енергоефективного водоочищення.

Тож, активний мул у метантенках не лише виступає основним каталізатором анаеробного очищення, а й є стратегічним компонентом у

					Б/11.03.61033.000-40 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

досягненні сталого розвитку очисних споруд, сприяючи енергонезалежності, зменшенню викидів парникових газів та повторному використанню біологічних ресурсів.

					Б/11.03.61033.000-40 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2. Опис технологічного процесу лінії очищення стічних вод та активного мулу з використанням метантенка

Комплекс обладнання, призначений для реалізації процесу анаеробного зброджування органічних відходів, які надходять з об'єктів комунального господарства, включає низку функціональних елементів. До складу цього комплексу входять системи для підготовки і транспортування субстрату, резервуари для зброджування, установки для збору, зберігання та утилізації біогазу, а також автоматизовані модулі керування усім технологічним процесом.

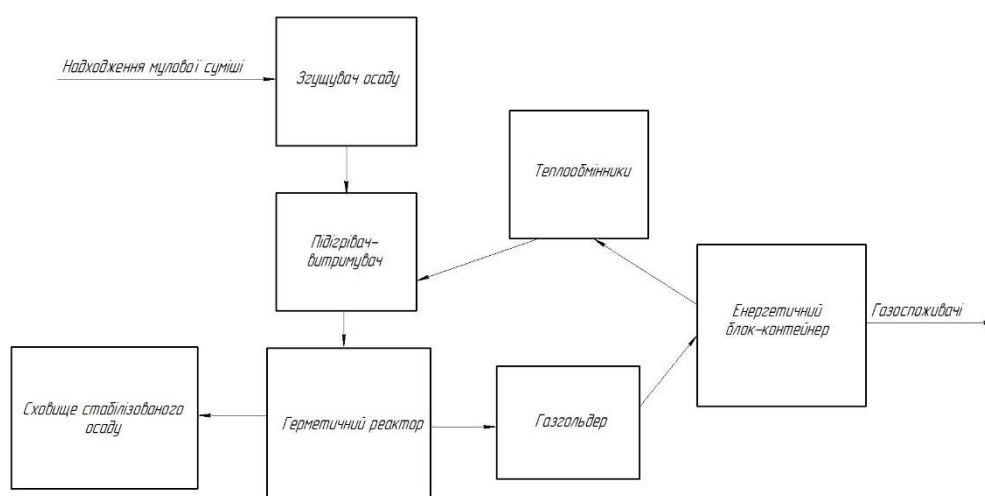


Рис. 1.1 Блок-схема переробки мулової суміші

Згідно з технологічною схемою (рис. 1.1), обробка мулової суміші здійснюється в кілька етапів. Первинне надходження мулу від станції очищення води відбувається у згущувач осаду. У цьому апараті, на додаток до штатного обладнання, монтується відцентровий насос, який поєднаний з вузлом подрібнення і системою внутрішнього перемішування. Для рівномірного розподілу потоку застосовується спеціальна гребінка, оснащена трьома трубопровідними затворами з електроприводами. Керування всією підготовчою ділянкою інтегроване в загальну систему автоматизації, яка розміщена у спеціальному блок-контейнері керування і синхронізується з основною системою зброджування. Основне завдання цієї підготовчої секції — формування однорідного (гомогенізованого) субстрату, який у

					Б/11.03.61033.000-40 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

встановлений період часу подається до теплової камери — підігрівача-витримувача.

Підігрівач-витримувач виконує функцію термічної підготовки біомаси, забезпечуючи її нагрів до температури близько $+55^{\circ}\text{C}$. Водночас із нагріванням відбувається первинна біохімічна активація мікрофлори субстрату. За допомогою механізму перемішування, що працює з певною періодичністю, маса рівномірно обробляється, після чого дозовано (приблизно раз на годину) подається в основну реакційну камеру — метантенк.

Метантенк — це герметичний біореактор, у якому в умовах без доступу кисню (анаеробне середовище) та при стабільній температурі, що підтримується на рівні близько $+38^{\circ}\text{C}$, відбувається процес зброджування. Мішалка в реакторі працює автоматично — двічі на годину, здійснюючи по два оберти в кожному напрямку (вліво і вправо), забезпечуючи цобережне, але достатнє перемішування для запобігання осіданню твердих фракцій. В результаті діяльності метаногенних мікроорганізмів у біомасі відбувається анаеробне розщеплення органічної речовини, що супроводжується утворенням біогазу — переважно метану (CH_4) та вуглекислого газу (CO_2).

Після завершення фази зброджування частина стабілізованої біомаси автоматично виводиться з реактора через гідрозатвор у кількості, еквівалентній об'єму нової порції субстрату. Відпрацьована маса направляється у сховище для тимчасового зберігання і подальшого використання як органічне добриво у сільському господарстві.

Біогаз, який утворюється в реакторі, надходить у газову камеру (газовий ковпак), звідки періодично транспортується до газгольдера. Для цього використовується система на базі насоса-компресора. Між реактором і газгольдером передбачені вологовідокремлювачі, прилади обліку витрати біогазу, а також запобіжні (зворотні) клапани, які унеможливають зворотний рух газу. Виведення газу із реактора відбувається при досягненні у ньому абсолютного тиску $0,098\text{ МПа}$ та припиняється при зниженні тиску до $0,091\text{ МПа}$. У газгольдері тиск підтримується на рівні до $0,17\text{ МПа}$, а при його

					Б/11.03.61033.000-40 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

перевищенні запобіжний клапан автоматично скидає надлишок біогазу в атмосферу.

Наступне використання біогазу передбачено для енергозабезпечення власних потреб комплексу: через спеціальну газошафову установку біогаз подається на пальники котлів, де використовується для підігріву води. Отримане тепло використовується в теплообмінниках підігрівача, метантенка, а також для опалення модулів керування та інших технічних приміщень.

Окрім основного джерела тепла — газового котла — в енергетичному модулі також змонтовано електроводонагрівач, який виконує функцію резервного та стартового джерела тепlopостачання. Його застосування актуальне під час запуску системи (у період, коли біогаз ще не виробляється) або в аварійних ситуаціях, пов'язаних із припиненням подачі палива.

Температура теплоносія у системі підтримується на рівні не вище +65 °С. Перевищення цього значення не допускається, оскільки вища температура може спричинити інтенсивне осідання твердих компонентів на внутрішніх поверхнях теплообмінників, що негативно впливає на тепловіддачу. Керування розподілом гарячої води здійснюється за допомогою автоматизованої гребінки з трьома вентилями з електроприводами, які відкриваються або закриваються на основі показників температурних датчиків, встановлених у підігрівачі та реакторі.

					Б/11.03.61033.000-40 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3. Призначення та область застосування метантенку

Установка призначена для комплексної, безвідходної та екологічно безпечної переробки органічних відходів різного походження, зокрема активного мулу з очисних споруд, залишків харчових продуктів органічного походження, а також рослинної біомаси. Основною метою функціонування системи є трансформація біологічних залишків у цінні вторинні ресурси — газоподібне паливо (біогаз), який у подальшому використовується для генерації електричної та теплової енергії, а також перетворення залишкової маси в екологічно безпечні добрива [2].

Внаслідок анаеробної обробки вихідної біомаси забезпечується отримання високоякісного біогазу, збагаченого метаном, який після очищення та стабілізації може бути використаний у когенераційних установках або як паливо для теплогенераторів. Крім того, тверді або рідкі залишки після зброджування (так званий дигестат) придатні до застосування як органічні добрива. Завдяки біотехнологічному процесу анаеробного розкладу відбувається знешкодження потенційно небезпечних компонентів, включаючи залишки нітратів і нітритів, життєздатні насіння бур'янів, патогенну мікрофлору, яйця гельмінтів і інші біологічні забруднювачі.

Кінцевий продукт характеризується відсутністю токсичних домішок та неприємних запахів, що робить його безпечним для подальшого використання у сільському господарстві як органічної добавки для ґрунту або як компонент для приготування біологічно активних компостів. Таким чином, установка забезпечує замкнутий цикл поводження з відходами, у якому поєднуються енергетична ефективність, ресурсозбереження та мінімальний вплив на навколишнє середовище [1,3].

					Б/11.03.61033.000-40 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3.1 Обґрунтування вибору метантенку

У сучасній практиці анаеробного зброджування використовуються різноманітні інженерні рішення, спрямовані на підвищення ефективності біохімічних перетворень. Одним із прикладів інноваційного підходу є шнековий метантенк безперервної дії, сконструйований в Україні, який реалізує концепцію просторової організації послідовних стадій ферментації. Такий технологічний підхід дозволяє адаптувати умови в кожній зоні апарата до специфіки відповідної стадії процесу, що своєю чергою сприяє зменшенню загальної тривалості бродіння з традиційних 15 діб до орієнтовно 3 діб.

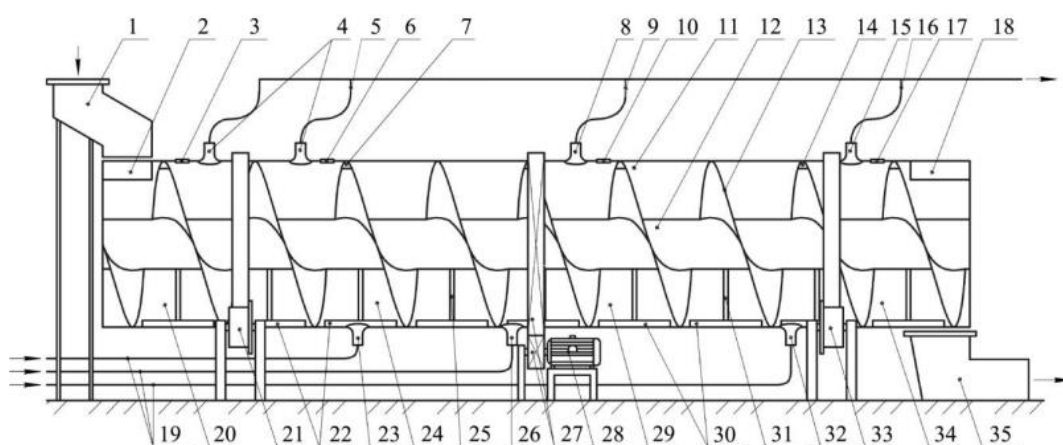


Рис. 2.1 Концепція проєкту безперервно працюючого гвинтового метантенка: 1 – завантажувальний пристрій; 2 – завантажувальний люк; 3 – запобіжний клапан від надлишкового тиску; 4, 8, 15 – ніпель; 5, 9, 16 – гнучкий шланг; 6 – запобіжний клапан від надлишкового тиску; 7, 14 – наскрізний отвір; 10 – запобіжний клапан від надлишкового тиску; 11 – жорсткий циліндричний корпус; 12 – порожнистий вал; 13 – горизонтальний гвинтовий конвеєр; 17 – запобіжний клапан від надлишкового тиску; 18 – розвантажувальний люк; 19 – гнучкі шланги; 20 – перша газова порожнина; 21, 33 – напрямні ролики; 22, 30 – теплообмінник; 23, 26, 32 – інжектор; 24 – друга газова порожнина; 25, 31 – стаціонарне лезо; 27 – механічна передача; 28 – двигун; 29 – третя газова порожнина; 34 – четверта газова порожнина; 35 – приймальний пристрій[8].

					Б/11.03.61033.000-40 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Конструктивна основа апарата — це жорсткий циліндричний горизонтально орієнтований корпус, який встановлений на направляючих роликах. Внутрішній простір обладнано горизонтальним шнековим механізмом, який забезпечує поступове переміщення субстрату вздовж осі резервуара. Привідна система складається з електродвигуна та редукторного передавання, які забезпечують обертальний рух усього корпусу. Завантаження біомаси здійснюється через спеціально передбачений люк, в який вводиться сировина, попередньо активована ферментативними добавками, які стимулюють початкову гідролітичну активність.

Поступове просування субстрату по секціях резервуара дозволяє реалізувати поетапну трансформацію органічної маси згідно з чотирма ключовими фазами анаеробного зброджування: гідроліз, ацидогенез, ацетогенез та метаногенез. У гідролітичній зоні відбувається розщеплення складних органічних полімерів на розчинні низькомолекулярні сполуки. Далі, на стадії ацидогенезу, ці сполуки трансформуються у леткі жирні кислоти, спирти та газоподібні метаболіти, зокрема вуглекислий газ. На етапі ацетогенезу зазначені продукти перетворюються в оцтову кислоту, яка у присутності водню у фінальній стадії метаногенезу є основним субстратом для утворення метану.

Кожна із зазначених фаз відбувається в окремій герметичній секції, яких у конструкції передбачено чотири, що дозволяє уникнути перехресного впливу метаболітів однієї стадії на іншу. Утворений біогаз акумулюється у спеціальних газозбірниках, звідки транспортується за допомогою ніпелів, з'єднаних із гнучкими термостійкими шлангами. Задля підтримання необхідного температурного режиму в об'ємі апарата інтегровано систему теплообмінників, яка забезпечує рівномірний розподіл тепла. Крім того, за допомогою інжекторів у субстрат вводяться ферменти та активні сполуки, що каталізують біохімічні реакції та підвищують інтенсивність ферментації.

Аби уникнути аварійних ситуацій, у верхній частині корпусу розміщено запобіжні клапани, які автоматично спрацьовують при перевищенні

					Б/11.03.61033.000-40 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

критичного тиску газової фази, здійснюючи контрольоване скидання надлишкового біогазу. По завершенню циклу обробки стабілізований осад, що утворився, вивантажується через спеціальний нижній люк. Отриманий осад вирізняється високим ступенем стабільності, покращеними санітарно-гігієнічними показниками та може використовуватись як ефективне органічне добриво агропромислового призначення [8].

Таким чином, застосування шнекового метантенка безперервної дії забезпечує не лише скорочення періоду зброджування (до 7 діб у виробничих умовах), але й покращення керованості процесом, що досягається завдяки чіткому розділенню функціональних зон, можливості оперативного моніторингу параметрів кожного етапу та внесенню коригувань у разі необхідності. Така конструкція є перспективною для впровадження у біоенергетичних комплексах та на підприємствах, які працюють із переробкою органічних відходів.

Серед сучасних конструкцій біореакторів для анаеробного зброджування особливої уваги заслуговує вертикальний метантенк із подвійними перегородками, які одночасно виконують функцію розподілу потоків біомаси та теплопередачі. Такий апарат розроблений з урахуванням підвищених вимог до енергоефективності та тепломасообміну у процесі ферментації, що дозволяє істотно покращити вихід біогазу, зокрема метану, порівняно з традиційними моделями.

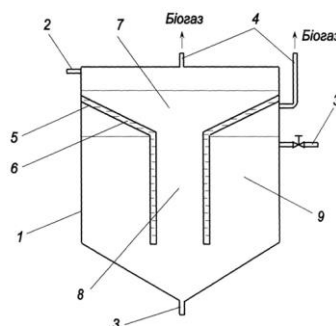


Рис. 2.2. Концепція проєкту вертикального метантенка: 1 – вертикальний корпус; 2 – патрубок для завантаження органічної маси; 3 – патрубок для вивантаження органічної маси; 4 – патрубок для відводу

					Б/11.03.61033.000-40 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

біогазу; 5 – перегородки; 6 – порожнина для подачі теплоносія; 7 – верхня камера; 8 – нижня внутрішня камера; 9 – нижня зовнішня камера[19].

Конструктивною особливістю є наявність вертикального циліндричного корпусу, внутрішній об'єм якого розділений на кілька функціональних камер за допомогою спеціальних перегородок. Ці перегородки виконані у вигляді подвійних стінок, що формують замкнені канали або порожнини, крізь які циркулює теплоносій. Завдяки цьому реалізується контрольований тепловий вплив на окремі зони біореактора, що забезпечує підтримку необхідного температурного режиму на кожному з етапів анаеробного зброджування.

Корпус біореактора поділено на три основні секції: верхню камеру, нижню внутрішню та нижню зовнішню камери. Така конфігурація дозволяє організувати поетапний рух органічної маси, що завантажується через верхній патрубок. Після введення сировини біомаса послідовно перетікає через камери, де під дією анаеробних мікроорганізмів відбувається глибокий мікробіологічний розклад органічних речовин із утворенням біогазу.

Для відведення газоподібних продуктів зброджування у верхній та нижній зовнішній камерах передбачено окремі патрубки. Це дозволяє здійснювати селективний збір біогазу з різними характеристиками: у верхній частині, де біомаса ще перебуває у фазі первинного розкладу, газ має підвищений вміст вуглекислого газу, тоді як у нижній зовнішній камері, де завершується метаногенез, концентрація метану значно вища. Такий підхід дозволяє ефективно контролювати якість отриманого біогазу відповідно до вимог споживача [9].

Однією з ключових переваг цієї конструкції є мінімізація змішування свіжої сировини зі стабілізованим осадом, що гарантує однорідність процесу на кожному етапі. Теплоізоляційні камери з теплоносієм підтримують стабільні гідротермічні умови, що є критичними для мікробіологічної активності, особливо в мезофільному та термофільному режимах. По завершенню ферментації стабілізована біомаса відводиться через окремий

					Б/11.03.61033.000-40 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

патрубок і, завдяки зниженому вмісту патогенів та збереженню органічних сполук, може використовуватись як ефективне органічне добриво.

Вертикальний метантенк із подвійними перегородками показує високу продуктивність і стабільність процесу зброджування, дозволяє мінімізувати втрати енергії, покращити параметри біогазу та забезпечити сталу якість кінцевого продукту для енергетичного чи агротехнічного застосування.

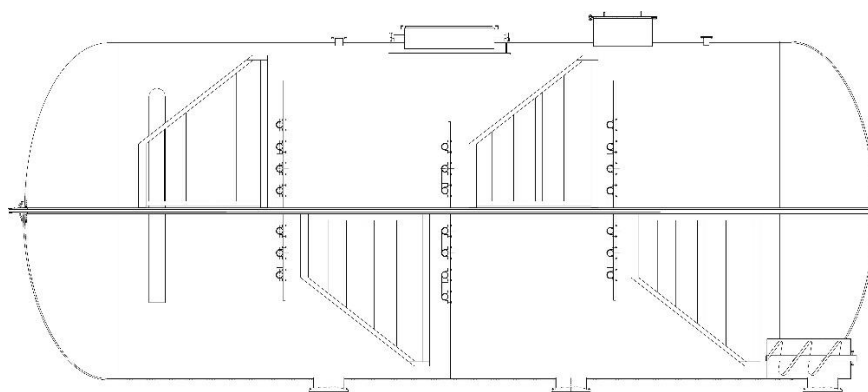


Рис. 2.3. Схема горизонтального метантенку з перемішувачем.

У конструкції метантенка, представлений на кресленні, передбачено наявність лопатевого перемішувального пристрою, який виконує важливу функцію підтримання гомогенності середовища у робочому об'ємі біореактора. Така система активного механічного перемішування відіграє важливу роль у забезпеченні рівномірного розподілу температури, поживних речовин та мікроорганізмів по всьому об'єму апарата, що сприяє стабілізації процесу анаеробного зброджування та підвищенню його ефективності [8].

Лопаті, які розміщені в центральній частині метантенка або уздовж осі його вертикального корпусу, обертаються за рахунок привідного вала, з'єднаного з редуктором та електродвигуном. Це дозволяє реалізувати постійне або періодичне перемішування субстрату з регульованою частотою обертання, що особливо важливо в умовах зміни температурного режиму або варіативності складу сировини. Завдяки такій конструкції забезпечується ефективний тепломасообмін між рідкою та газовою фазами, зменшується ймовірність утворення термічних та гідродинамічних градієнтів, а також

					Б/11.03.61033.000-40 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

усуваються застійні зони, в яких можливе локальне накопичення осаду або утворення поверхневої кірки.

Важливою перевагою такої системи є запобігання стратифікації вмісту біореактора, що дозволяє підтримувати високу метаболічну активність анаеробної мікрофлори в усьому об'ємі. Таким чином, конструкція сприяє підвищенню виходу біогазу та стабілізації параметрів кінцевого осаду, придатного до подальшого використання як органічного добрива.

Водночас, лопатеве перемішування має і певні техніко-економічні обмеження. По-перше, функціонування мішального вузла супроводжується додатковими енерговитратами, що негативно впливає на загальну енергоефективність установки. По-друге, наявність рухомих частин у середовищі з підвищеною корозійною та абразивною дією потребує використання високоякісних матеріалів, регулярного технічного обслуговування та періодичної заміни зношених елементів.

Також надмірна інтенсивність перемішування у деяких випадках може мати інгібуючий ефект на чутливі мікробні спільноти, зокрема на метаногени, що відповідають за завершальну фазу анаеробного зброджування — метаногенез. Порушення структури біоплівки або підвищення механічного стресу в мікросередовищі може призвести до зниження ефективності біогазоутворення [10].

Отже, застосування лопатевого механізму у конструкції метантенка є доцільним з точки зору покращення гідродинаміки та тепломасообміну, однак потребує детального інженерного розрахунку щодо енерговитрат, зносостійкості матеріалів, а також врахування біологічної чутливості мікрофлори до умов перемішування.

					Б/11.03.61033.000-40 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4. Патентний пошук

Найменування теми «Метантенк»

Етап Проектування апарата та його частин

Обґрунтування регламенту пошуку **Предмет пошуку** – метантенк (об'єктом пошуку є винаходи та корисні моделі).

Мета пошуку інформації – визначення патентної ситуації щодо апаратів

Визначення держав пошуку. Встановлюємо такі держави пошуку:

Україна, США, Німеччина, Китай, Канада, Індія.

Ретроспективність. Регламент пошуку встановлюємо: 2010–2025 роки.

Класифікаційні індекси. Міжнародна патентна класифікація: MKI: C02F 11/04 (Анаеробне очищення стічних вод), C02F 3/28 (Обробка осадів), C12M 1/107 (Анаеробні біореактори)

Уніфікована десятикова класифікація УДК:628.336.3.

Джерела інформації. 1)Патентні бази даних WIPO, Espacenet, Google Patents;
2)Наукові публікації та дисертації з відкритим доступом.

					Б/11.03.61033.000–40 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

5. Технічна характеристика апарату

1. Призначення – для виділення біогазу з відходів комунального господарства.
2. Об'єм
 - номінальний – 150 м^3 ;
 - робочий – 120 м^3 .
3. Тиск
 - робочий – $0,2 \text{ МПа}$;
 - при випробуваннях – $0,3 \text{ МПа}$.
4. Температура
 - середовища в апараті – $38 \text{ }^\circ\text{C}$;
 - охолоджуючої води – $30 \text{ }^\circ\text{C}$.
5. Витрати охолоджуючої води – $10 \text{ м}^3/\text{год}$;
6. Площа поверхні теплообміну – $24,5 \text{ м}^2$.
7. Перемішуючий пристрій:
 - привід перемішуючого пристрою:
 - двигун асинхронний трифазний вибухозахищений 3В180М8;
 - редуктор черв'ячний Ч-100;
 - частота обертання – $0,1 \text{ с}^{-1}$.
8. Рівень шуму $\leq 75 \text{ дБ}$.
9. Середовище в апараті – нетоксичне, корозійне, вибухонебезпечне.
10. Маса виробу в робочому стані – $200\,000 \text{ кг}$.
11. Габаритні розміри, м - $13 \times 4,65 \times 5,92$.

					Б/11.03.61033.000-40 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

6. Обґрунтування вибору конструкції, опис конструкції апарату, вибір матеріалів

6.1. Вибір матеріалів для виготовлення

Мулова суміш безпосередньо контактує з внутрішніми поверхнями технологічного апарату, що зумовлює підвищені вимоги до вибору матеріалу конструкції. Такий контакт вимагає, аби матеріал корпусу мав високу стійкість до впливу агресивного середовища, включаючи хімічні та біологічні компоненти, характерні для мулових сумішей. Водночас, матеріал повинен зберігати свою корозійну стійкість і механічні властивості в умовах підвищеної вологості та температур, які супроводжують процеси анаеробного зброджування [11].

Серед конструкційних вимог до матеріалу апарату — здатність до якісного зварювання без втрати цілісності структури, достатня міцність і пластичність в експлуатаційних умовах, а також придатність до холодної та гарячої механічної обробки (штампування, гнуття, зварювання). Важливим критерієм також є економічна доцільність — бажано, щоб матеріал мав прийнятну вартість і був доступним у виробничому постачанні.

Оптимальним вибором для таких умов є високолегована корозійностійка сталь марки 08X18H10T, яка відповідає вимогам стандарту ГОСТ 5632–92. Цей сплав відзначається високою хімічною інертністю, надійністю в зварних з'єднаннях, стійкістю до міжкристалітної корозії та тривалою експлуатаційною стабільністю в агресивних середовищах.

Що стосується ущільнювальних елементів, зокрема прокладок, їх матеріал також повинен бути стійким до механічного впливу та мати низьку схильність до деформації при стисненні. Заразом, він має бути доступним за ціною та не дефіцитним у постачанні. Виходячи з наведених вимог, доцільним є застосування прокладного матеріалу типу пароніт марки А-25-1-ПОН, що відповідає вимогам ГОСТ 15180–96. Цей матеріал забезпечує надійне

					Б/11.03.61033.000–40 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

герметичне з'єднання у вузлах із динамічним навантаженням та стабільну роботу при підвищених температурах і тиску.

6.2 Опис конструкції, основних компонентів та деталей

Апарат, призначений для отримання біогазу шляхом анаеробного зброджування органічних відходів комунального походження, являє собою ємнісну установку циліндричної форми, обладнану системою перемішування та вбудованими теплообмінними елементами. Конструктивно корпус апарата складається з вертикальної обичайки, виготовленої зі зварених між собою сталевих листів, двох еліптичних днищ (верхнього та нижнього) і трьох сідлових опор, які забезпечують стійке встановлення на фундаменті. Всі зварні з'єднання виконуються згідно з вимогами стандарту ГОСТ 5264–80.

У внутрішньому об'ємі апарата передбачено встановлення чотирьох перемішувальних механізмів, які забезпечують періодичну циркуляцію біомаси з метою запобігання утворенню осаду та забезпечення рівномірного розподілу температури й активної мікрофлори. Водночас, передбачено три вертикальні перетинки, що виконують функцію опорних елементів для теплообмінних труб. На цих перегородках за допомогою фіксуючих хомутів закріплюються теплообмінні труби діаметром 85,5 мм з товщиною стінки 3,5 мм, які виготовляються відповідно до вимог ГОСТ 3262–96.

Конструкція апарата також включає цілу низку функціональних патрубків (штуцерів), зокрема: для подачі вхідного субстрату; для відведення біогазу, що утворюється; для підведення та відведення теплоносія до внутрішніх теплообмінників; для встановлення контрольних приладів — датчиків тиску, температури, рівня рідини. Додатково передбачено установку запобіжного клапана, який спрацьовує у разі перевищення допустимого тиску всередині апарата, а також оглядового люка-лазу для обслуговування внутрішнього простору.

					Б/11.03.61033.000–40 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

На випадок аварійних ситуацій конструкцією передбачено два окремі штуцери для екстреного скидання надлишкового об'єму субстрату. Для проведення планового вивантаження стабілізованої біомаси апарат оснащено шнековим розвантажувальним пристроєм, який забезпечує контрольований вивід твердої фази з нижньої частини корпусу.

7. Розрахунки, що підтверджують працездатність та надійність конструкції

7.1 Матеріальний баланс

Метою даного розрахунку є встановлення теоретично можливого обсягу утворення біогазу в результаті анаеробного зброджування органічного субстрату, а також визначення оптимального конструктивного об'єму апарата, необхідного для реалізації процесу з урахуванням заданих параметрів.

Вихідні дані для розрахунку:

- продуктивність установки $Q = 200\,000\text{ м}^3 / \text{доб}$;
- концентрація зважених частинок $C = 500\text{ мг/л}$;
- повне біологічне споживання кисню – 180 мг/л ;
- ефект освітлення в первинних відстійниках – 80% .

Залишок осаду за речовиною сухою

$$Q_{\text{сх}} = \frac{C \cdot E \cdot k}{1000 \cdot 1000} Q = \frac{500 \cdot 0,8 \cdot 1,1}{1000 \cdot 1000} 200000 = 88\text{ т/доб} [12]$$

де $C = 500$ – концентрація часток зважених,

$E = 80\%$ – ефективність зважених затримання часток в первинних відстійниках,

k – Коефіцієнт корекції, що враховує приріст об'єму осаду за рахунок наявності у ньому великих фракцій зважених речовин, які не потрапляють до складу відібраних зразків під час лабораторного аналізу.

$$k = 1,1 \div 1,2 [12]$$

					Б/11.03.61033.000-40 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

У процесі освітлення води в первинних відстійниках спостерігається зниження концентрації органічних забруднень, визначених за біохімічним споживанням кисню (БСК), у середньому на 15–25 %. Приймаючи середнє з цього інтервалу значення 20%, знайдемо БПК_{повн} у воді, що потрапляє до аеротенків:

$$L_a = 180(1 - 0,2) = 144 \text{ мг/л}$$

Приймаємо, що втрати активного мулу зі стічною водою при його винесенні з вторинного відстійника становлять 15 мг/л . Відповідно, залишкова маса активного мулу в перерахунку на суху речовину визначається як:

$$I_{\text{сух}} = \frac{0,8 \cdot C(1 - E) + aL_a - b}{1000 \cdot 1000} Q = \frac{0,8 \cdot 500(1 - 0,8) + 0,3 \cdot 144 - 15}{1000 \cdot 1000} 200000 = 27,4 \text{ т/доб}$$

де $a = 0,3 \div 0,5$ – коефіцієнт приросту активного мулу,

$b = 15$ - виведення активного мулу з вторинних відстійників, мг/л .

Для розрахунку витрати осаду і мулу за беззольною речовиною при зольності осаду $Z_{\text{ос}} = 20\%$, зольності активного мулу $Z_{\text{мул}} = 15\%$ і гігроскопічній вологості осаду і мулу B_z і B_z' , що дорівнює 2%, приймаємо

$$Q_{\text{без}} = \frac{Q_{\text{сух}}(100 - B_z)(100 - Z_{\text{ос}})}{100 \cdot 100} = \frac{88 \cdot (100 - 2)(100 - 20)}{100 \cdot 100} = 68,992 \text{ т/доб} \approx 69 \text{ т/доб}$$

$$I_{\text{без}} = \frac{I_{\text{сух}}(100 - B_z')(100 - Z_{\text{мул}})}{100 \cdot 100} = \frac{27,4(100 - 2)(100 - 15)}{100 \cdot 100} = 22,824 \text{ т/доб} \approx 23 \text{ т/доб}$$

де B_z , B_z' - гігроскопічна вологість сирого осаду і активного мулу відповідно, %;

$Z_{\text{ос}}$, $Z_{\text{мул}}$ - зольність сухого осаду і активного мулу відповідно, %.

Під час виведення осаду з відстійників доцільно приймати його вологість на рівні 94 %. Для ущільненого активного мулу цей показник, як правило, становить близько 97 %. Щільність як осаду, так і активного мулу в інженерних

					Б/11.03.61033.000-40 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

розрахунках допускається приймати рівною 1 г/см^3 (або 1000 кг/м^3), що відповідає щільності води при нормальних умовах.

Відповідно до прийнятих значень вологості та щільності, визначаються витрати осаду та надлишкового активного мулу. Ці витрати розраховуються на основі масової частки сухої речовини та загального об'єму утвореного осаду, що виводиться з відстійників у процесі очищення стічних вод.

$$V_{oc} = \frac{100 \cdot Q_{сyx}}{(100 - W_{oc}) \rho_{oc}} = \frac{100 \cdot 88}{(100 - 94) \cdot 1} = 1,467 \cdot 10^3 \text{ м}^3 / \text{доб}$$

$$V_{mul} = \frac{100 \cdot I_{сyx}}{(100 - W_{mul}) \rho_{mul}} = \frac{100 \cdot 27,4}{(100 - 97) \cdot 1} = 913,33 \text{ м}^3 / \text{доб}$$

де W_{oc} , W_{mul} – Вологість сирого осаду та надлишкового активного мулу, відповідно, становить 94 % і 97 %. Ці значення приймаються як типові для умов водоочисних споруд та використовуються у розрахунках маси та об'єму утворених осадів, %;

ρ_{oc} , ρ_{mul} – щільність осаду і надлишкового активного мулу відповідно

Сумарні витрати осаду і мулу:

за сухою речовиною

$$M_{сyx} = Q_{сyx} + I_{сyx} = 88 + 27,4 = 115,4 \text{ т} / \text{доб}$$

за беззольною речовиною

$$M_{без} = Q_{без} + I_{без} = 69 + 23 = 92 \text{ т} / \text{доб}$$

за об'ємом суміші фактичної вологості

$$M_{заг} = V_{oc} + V_{mul} = 1,467 \cdot 10^3 + 913,33 = 2,38 \cdot 10^3 \text{ м}^3 / \text{доб}$$

Середнє значення вологості суміші і зольності, % :

					Б/11.03.61033.000-40 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$B_{\text{сум}} = 100 \left(1 - \frac{M_{\text{сух}}}{M_{\text{заг}}} \right) = 100 \left(1 - \frac{115,4}{2,38 \cdot 10^3} \right) = 95,15 \%$$

$$Z_{\text{сум}} = 100 \left(1 - \frac{\frac{M_{\text{без}}}{\frac{Q_{\text{сух}}(100 - B_z)}{100} - \frac{I_{\text{сух}}(100 - B'_z)}{100}}}{\frac{92}{88(100 - 2)} - \frac{27,4(100 - 2)}{100}} \right) = 100 \left(1 - \frac{92}{\frac{92}{88(100 - 2)} - \frac{27,4(100 - 2)}{100}} \right) = 18,8 \%$$

При виборі оптимального режиму анаеробного зброджування слід враховувати порівняльні характеристики термофільного та мезофільного процесів. Термофільне бродіння характеризується значно вищою швидкістю перебігу процесу — тривалість утилізації органічних речовин у цьому режимі приблизно вдвічі коротша, ніж у мезофільному. Крім того, термофільні умови забезпечують повну дегельмінтизацію осаду, що є перевагою з точки зору санітарно-епідеміологічної безпеки. Водночас, цей режим потребує підвищених витрат енергії на стабільне підтримання температури в метантенках, що суттєво підвищує експлуатаційні витрати. Окрім того, осад, оброблений у термофільному режимі, має нижчу здатність до зневоднення, що ускладнює його подальшу обробку.

З огляду на те, що проєктом передбачено механізовану систему зневоднення зброженого осаду з подальшим термічним сушінням, доцільним є застосування мезофільного режиму зброджування. Такий підхід дозволяє мінімізувати витрати теплової енергії, оскільки необхідну кількість тепла можна повністю забезпечити за рахунок спалювання утвореного біогазу.

Відповідно до прийнятих параметрів, приймаємо дозу завантаження для мезофільного режиму на рівні $D=20\%$. Це означає, що масова частка сухої речовини в завантаженому субстраті становить 20 %.

На основі зазначених умов визначається необхідний об'єм метантенків за відповідною методикою розрахунку:

$$V = \frac{M_{\text{заг}} \cdot 100}{D} = \frac{2,38 \cdot 10^3 \cdot 100}{20} = 1,19 \cdot 10^4 \text{ м}^3$$

					Б/11.03.61033.000-40 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

де D – доза завантаження осаду в метантенк за добу, %.

При об'ємі одного апарату 150 м^3 – необхідна кількість апаратів становить

$$\frac{1,19 \cdot 10^4}{150} = 79,3 \approx 80$$

Границя розпаду суміші осаду і активного мулу

$$a_{\text{сум}} = \frac{(a_{\text{ос}} \cdot Q_{\text{без}} + a_{\text{м}} \cdot I_{\text{без}})}{M_{\text{без}}} = \frac{(60 \cdot 69 + 55 \cdot 23)}{92} = 58,76 \%$$

де a_o і a_m - границі розпаду відповідно осаду і мулу. Приймаємо $a_o = 60\%$, $a_m = 55\%$.

Для розрахунку теоретичного виходу біогазу з одного кілограма органічної речовини, що міститься в осаді, приймається газовий вихідний коефіцієнт $\eta=0,5$. Це значення відповідає умовам загальної вологості осаду $W_{\text{сум}}=96\%$ та температурі процесу $t = 33^\circ$, згідно з нормами СНіП 2.04.03–85. Тоді

$$y' = \frac{(a_{\text{сум}} - nD)}{100} = \frac{(58,76 - 0,56 \cdot 20)}{100} = 0,48 \text{ м}^3/\text{кг}$$

Сумарний вихід газу

$$G = y' \cdot M_{\text{без}} \cdot 1000 = 0,48 \cdot 92 \cdot 1000 = 4,367 \cdot 10^4 \text{ м}^3/\text{доб}$$

Тоді вихід газу з одного метантенку:

$$G_{\text{м}} = \frac{4,367 \cdot 10^4}{80} = 546 \text{ м}^3/\text{доб}$$

Для вирівнювання тиску в газовій мережі передбачені мокрі газгольдини, місткість V_z яких розраховується на $2 \div 4$ години виходу газу:

$$V_z = \frac{4,367 \cdot 10^4 \cdot 4}{24} = 7278,3 \text{ м}^3$$

					Б/11.03.61033.000-40 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для акумуляції біогазу, що утворюється в результаті процесу зброджування, приймається встановлення 12 типових газгольдерів, кожен об'ємом 600 м³. Така конфігурація забезпечує достатній резервуарний об'єм для компенсації нерівномірного газовиділення та покриття пікових навантажень при споживанні біогазу.

Наступним етапом є оцінка якості суміші, яка підлягає анаеробному бродінню, зокрема визначення її вологості та зольності. У процесі ферментації відбувається розпад органічних (беззольних) компонентів субстрату, внаслідок чого загальна маса сухої речовини зменшується, тоді як масова частка води у суміші зростає. При цьому сумарний об'єм суміші після проходження процесу зброджування умовно приймається сталим, що дозволяє спростити розрахунки.

Ключовим показником у розрахунках служить величина $y'y'$, що характеризує ступінь розпаду беззольної речовини та визначається на основі кількості утвореного біогазу. У даному випадку приймається значення y' , що виражена у відсотках, являє собою ступінь розпаду беззольної речовини, підраховану за виходом газу. В даному випадку $y' = 0,43 \%$.

Тоді маса беззольної речовини в зароджуваній суміші

$$M'_{\text{без}} = \frac{M_{\text{без}}(100 - y')}{100} = \frac{92(100 - 43)}{100} = 91,38 \text{ м/дооб}$$

Різниця $M_{\text{сух}} - M_{\text{без}}$ являє собою зольну частину, яка не підлягає зміні в процесі бродіння. Тому маса сухої речовини в зброджуваній суміші

$$M'_{\text{сух}} = (M_{\text{сух}} - M_{\text{без}}) + M'_{\text{без}} = (115 - 92) + 91,38 = 115 \text{ м/дооб}$$

Знаючи $M'_{\text{сух}}$ і $M'_{\text{без}}$ та приймаючи гігроскопічну вологість зброджуваної суміші 6% можна визначити її зольність

$$Z_{\text{сум}} = 100 - \frac{M'_{\text{без}} \cdot 100 \cdot 100}{M'_{\text{сух}}(100 - 6)} = 100 - \frac{91,38 \cdot 100 \cdot 100}{115 \cdot (100 - 6)} = 15,4 \%$$

					Б/11.03.61033.000-40 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Визначимо вологість зароджуваної суміші

$$B'_{\text{сум}} = 100 - \frac{M'_{\text{сух}}}{M_{\text{заг}}} 100 = 100 - \frac{115}{2,38 \cdot 10^3} 100 = 95,17 \%$$

Таким чином бродіння призводить до збільшення вологості і зольності зброджуваної маси.

Відомо, що концентрація ПАР в стічній воді становить 6 %.

При такому вмісті ПАР в воді, вміст їх в сирому осаді становить $c = 5$ мг/л (або 17 кг/т), а в активному мулі $c' = 3$ кг/т сухої речовини.

$$C = \frac{(Q_{\text{сух}} \cdot c + I_{\text{сух}} \cdot c')}{M_{\text{сух}}} = \frac{(5 \cdot 88 + 3 \cdot 27,4)}{1000 \cdot 1000} = 4,525 \text{ мг/г}$$

Гранично припустиме навантаження за ПАР на 1 м^3 об'єму метантенку приймаємо рівною 40 г (СНіП 2.04.03-85). Припустима доза завантаження метантенків

$$D' = \frac{10q}{C(100 - B_{\text{сум}})} = \frac{10 \cdot 40}{4,525(100 - 95,151)} = 18,231 \%$$

Тоді необхідний об'єм метантенків

$$V = \frac{M_{\text{заг}} \cdot 100}{D'} = \frac{2,38 \cdot 10^3 \cdot 100}{18,23} = 1,305 \cdot 10^4 \text{ м}^3$$

Кількість метантенків

$$\frac{1,305 \cdot 10^3}{150} = 87$$

Отже, присутність поверхнево-активних речовин (ПАР) у складі зброджуваної суміші спричиняє зниження ефективності процесу зброджування, що, своєю чергою, обумовлює необхідність збільшення розрахункового об'єму метантенків для забезпечення стабільної роботи системи.

					Б/11.03.61033.000-40 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

7.2 Тепловий розрахунок

Метою даного розрахунку є визначення необхідної площі теплообмінної поверхні, яка забезпечить підтримання стабільного теплового режиму в апараті відповідно до заданих технологічних параметрів. Вихідні дані для розрахунку:

- характеристика холодного теплоносія:
- початкова температура води $t_n = 30 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- густина води $\rho_s = 996 \text{ кг/м}^3$
- коефіцієнт в'язкості динамічний $\mu_s = 804 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с}$
- коефіцієнт теплопровідності $\lambda_s = 0,618 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$
- характеристика гарячого теплоносія:
- температура перетікання процесу $t_n = 38 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- густина субстрату $\rho_c = 1020 \text{ кг/м}^3$
- витрати субстрату $V_c = 29,75 \text{ м}^3/\text{доб.}$

Тепловий баланс

$$Q_c + Q_p = Q_s + Q_z + Q_n$$

де - Q_c – теплота суміші осаду та мулу фактичної вологості;

- Q_p – теплота реакції;
- Q_s – теплота води, що використовується на охолодження суміші осаду і мулу після підігрівання в підігрівачі-витримувачі.
- Q_z – теплота газу, що утворюється;
- Q_n – витрати тепла в навколишнє середовище.

Зазвичай Q_n приймають 3%.

					Б/11.03.61033.000-40 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$Q_n = 0.03(Q_6 + Q_7)$$

Теплота газу, що утворюється, визначимо за формулою:

$$Q_2 = \rho_2 \cdot V_2 \cdot c_p \cdot t$$

де - ρ_2 – густина газової суміші, що утворюється

Відомо що газова суміш складається з наступних компонентів:

70% - CH_4 – метан, $\rho(\text{CH}_4) = 0,72 \text{ кг/м}^3$, $c(\text{CH}_4) = 2,23 \cdot 10^3 \text{ Дж/кг} \cdot \text{К}$;

26% - CO_2 – вуглекислий газ, $\rho(\text{CO}_2) = 1,98 \text{ кг/м}^3$, $c(\text{CO}_2) = 0,838 \cdot 10^3 \text{ Дж/кг} \cdot \text{К}$;

1% - H_2 – водень, $\rho(\text{H}_2) = 0,0899 \text{ кг/м}^3$, $c(\text{H}_2) = 14,3 \cdot 10^3 \text{ Дж/кг} \cdot \text{К}$;

2% - N_2 – азот, $\rho(\text{N}_2) = 1,25 \text{ кг/м}^3$, $c(\text{N}_2) = 1,05 \cdot 10^3 \text{ Дж/кг} \cdot \text{К}$;

1% - H_2S – сірководень, $\rho(\text{H}_2\text{S}) = 1,54 \text{ кг/м}^3$, $c(\text{H}_2\text{S}) = 1,06 \cdot 10^3 \text{ Дж/кг} \cdot \text{К}$.

Тоді густина газової суміші: [13]

$$\begin{aligned} \rho_2 &= y(\text{CH}_4) \cdot \rho(\text{CH}_4) + y(\text{CO}_2) \cdot \rho(\text{CO}_2) + y(\text{H}_2) \cdot \rho(\text{H}_2) + \\ &+ y(\text{N}_2) \cdot \rho(\text{N}_2) + y(\text{H}_2\text{S}) \cdot \rho(\text{H}_2\text{S}) = \\ &= 0,7 \cdot 0,72 + 0,26 \cdot 1,98 + 0,01 \cdot 0,0899 + 0,02 \cdot 1,25 + 0,01 \cdot 1,54 = 1,06 \text{ кг/м}^3 \end{aligned}$$

де y – Об'ємна частка кожного з компонентів газової суміші характеризує його питому участь у загальному об'ємі біогазу, тоді як ρ - позначає густину відповідного компонента газової фази, виражену в стандартних умовах.

Виходячи з того, що за добу в метантенку утворюється 545 м^3 біогазу, приймаємо витрати біогазу

$$V_2 = \frac{545}{24 \cdot 3600} = 6,308 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{сек}$$

Теплоємність газової суміші [41]

					Б/11.03.61033.000-40 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\begin{aligned}
c_z &= y(CH_4) \cdot \rho(CH_4) \cdot (CH_4) + y(CO_2) \cdot \rho(CO_2) \cdot c(CO_2) + y(H_2) \cdot \rho(H_2) \cdot c(H_2) + \\
&+ y(N_2) \cdot \rho(N_2) \cdot (N_2) + y(H_2S) \cdot \rho(H_2S) \cdot c(H_2S) = \\
&= 0,7 \cdot 0,72 \cdot 2,23 \cdot 10^3 + 0,26 \cdot 1,98 \cdot 0,838 \cdot 10^3 + 0,01 \cdot 0,0899 \cdot 14,3 \cdot 10^3 + \\
&+ 0,02 \cdot 1,25 \cdot 1,05 \cdot 10^3 + 0,01 \cdot 1,54 \cdot 1,06 \cdot 10^3 = 1,611 \text{ Дж/кг} \cdot K
\end{aligned}$$

За температуру газової суміші приймаємо температуру протікання процесу $t = 38 \text{ }^\circ\text{C}$

В результаті отримуємо

$$Q_z = \rho_z \cdot V_z \cdot c_p \cdot t = 1,06 \cdot 6,308 \cdot 10^{-3} \cdot 1,611 \cdot 10^3 \cdot 35 = 377 \text{ Вт}$$

Визначимо теплоту мулової суміші.

Витрати суміші з попередніх розрахунків становлять $V_c = 29,75 \text{ м}^3/\text{доб}$ на один метантенк. Густина субстрату $\rho = 1020 \text{ кг/м}^3$.

Маса субстрату, що надходить до метантенку за добу

$$m_c = V_c \cdot \rho_c = 29,75 \cdot 1020 = 3,034 \cdot 10^4 \text{ кг}$$

Масові витрати субстрату

$$G_c = \frac{m_c}{24} = \frac{3,034 \cdot 10^4}{24} = 1,264 \cdot 10^3 \text{ кг/год}$$

Приймаємо час завантаження 30 хвилин. Тоді

$$G_c = \frac{1,264 \cdot 10^3}{1200} = 1,054 \text{ кг/сек}$$

Об'ємні витрати субстрату за той самий час становлять

$$v_c = \frac{G_c}{\rho_c} = \frac{1,054}{1020} = 1,033 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{сек}$$

Теплоємність мулової суміші становить, $c_c = 3500 \text{ Дж/кг} \cdot K$, коефіцієнт теплопровідності $\lambda_c = 0,6 \text{ Вт/(м} \cdot K)$.

					Б/11.03.61033.000-40 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Початкова температура, з якою субстрат надходить у метантенк, становить $t_n = 55\text{ }^{\circ}\text{C}$, кінцева дорівнює температурі протікання процесу і становить $t_k = 38\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Тоді теплота субстрату

$$Q_c = G_c \cdot c_c (t_n - t_k) = 1,054 \cdot 3500 (55 - 38) = 7,376 \cdot 10^4 \text{ Вт}$$

Визначаємо теплоту води.

Розіб'ємо розрахунок на три випадки.

1. Теплота реакції відсутня.

$$Q_p = 0$$

Тоді з матеріального балансу

$$Q_{a1} = \frac{Q_c}{1,03} - Q_z = \frac{7,376 \cdot 10^4}{1,03} - 377 = 7,123 \cdot 10^4 \text{ Вт}$$

Прийmemo $\Delta t_g = 5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Теплоємність води приймаємо $c_g = 4180 \text{ Дж/кг}\cdot\text{К}$.

Витрати води на охолодження тоді

$$G_g = \frac{Q_{a1}}{c_g \cdot \Delta t_g} = \frac{7,123 \cdot 10^4}{4180 \cdot 5} = 2,9 \text{ кг/сек}$$

Прийmemo початкову температуру води $t_n = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$, кінцеву - $t_k = 35\text{ }^{\circ}\text{C}$.

При $t_n = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ властивості води наступні:

- густина води $\rho_g = 996 \text{ кг/м}^3$
- коефіцієнт в'язкості динамічний $\mu_g = 804 \cdot 10^{-6} \text{ Па}\cdot\text{с}$
- коефіцієнт теплопровідності $\lambda_g = 0,618 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$

Об'ємні витрати води за той самий час становлять

					Б/11.03.61033.000-40 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$v_g = \frac{G_g}{\rho_g} = \frac{2,9}{996} = 2,139 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{сек}$$

Середню температурну різницю, що використовується у рівнянні теплопередачі для випадку змішаного (односпрямованого) руху теплоносіїв, визначають за наступною залежністю:

$$\Delta t_{сер} = \varepsilon_{\Delta t} \cdot \Delta t_{np}$$

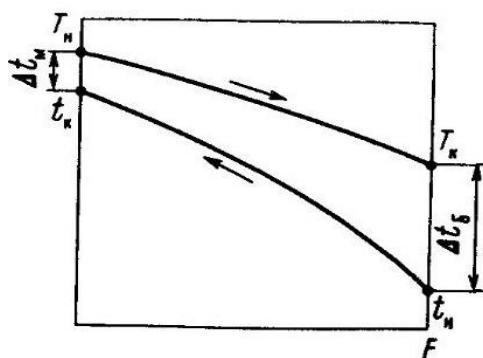
де $\varepsilon_{\Delta t}$ - поправочний коефіцієнт до середньої різниці температур Δt_{np} , порашованої для протитоку. Для розрахунку даного коефіцієнту необхідні наступні величини:

$$P = \frac{t_{кв} - t_{нв}}{T_{nc} - t_{нв}} = \frac{35 - 30}{55 - 38} = 0,2$$

$$R = \frac{T_{nc} - T_{кв}}{t_{кв} - t_{нв}} = \frac{55 - 35}{38 - 30} = 3,4$$

За діаграмою [14] за допомогою визначених параметрів знаходимо необхідне значення поправочного коефіцієнту $\varepsilon_{\Delta t} = 0,95$.

Знаходимо середню різницю температур Δt_{np} для протитоку



$$\begin{aligned} 30^\circ\text{C} & \longrightarrow 35^\circ\text{C} \\ 38^\circ\text{C} & \longleftarrow 55^\circ\text{C} \\ \Delta t_m = 8^\circ\text{C} & \qquad \Delta t_{\delta} = 20^\circ\text{C} \\ \Delta t_{np} = \frac{\Delta t_{\delta} - \Delta t_m}{\ln\left(\frac{\Delta t_{\delta}}{\Delta t_m}\right)} = \frac{20 - 8}{\ln\left(\frac{20}{8}\right)} = 13^\circ\text{C} \end{aligned}$$

Тоді середня різниця температур

Рис 3.1. До визначення різниці температур при протитоку

$$\Delta t_{сер} = \varepsilon_{\Delta t} \cdot \Delta t_{np} = 0,95 \cdot 13 = 12^\circ\text{C}$$

Прийmemo попередньо коефіцієнт теплопередачі $k = 400 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

					Б/11.03.61033.000-40 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Орієнтовна площа теплообміну в цьому випадку становить

$$F_{op} = \frac{Q_c}{k \cdot \Delta t_{сер}} = \frac{7,376 \cdot 10^4}{400 \cdot 12} = 13 \text{ м}^2$$

Із стандартного ряду обираємо трубу (ГОСТ 3262-75) з наступними параметрами:

- $d_{зов} = 0,0885 \text{ м}$ – зовнішній діаметр труби;
- $d_{вн} = 0,081 \text{ м}$ – внутрішній діаметр труби;
- $\delta_{ст} = 0,0035 \text{ м}$ – товщина стінки;
- $\lambda_{ст.} = 24,7 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$ – коефіцієнт теплопровідності сталі.

Орієнтовна загальна довжина труби

$$L_{op} = \frac{2F_{op}}{\pi(d_{зов} + d_{вн})} = \frac{2 \cdot 13}{3,14(0,0885 + 0,081)} = 48,7 \text{ м}$$

Виходячи з конструктивних зображень приймаємо довжину однієї труби рівною $l = 3,5 \text{ м}$.

Тоді орієнтовна кількість труб

$$n_{тр} = \frac{L}{l} = \frac{76,767}{3,5} = 14$$

Передбачаємо в апараті три теплообмінні секції по 6 труб в кожній.

Для забезпечення турбулентного режиму течії в трубах, швидкість течії води повинна бути більшою, ніж

$$w = \frac{1000 \cdot \mu_{\text{в}}}{d_{\text{вн}} \cdot \rho_{\text{в}}} = \frac{1000 \cdot 804 \cdot 10^{-6}}{0,081 \cdot 996} = 0,01 \text{ м/сек}$$

Знайдемо швидкість і критерій Рейнольдса для води:

					Б/11.03.61033.000-40 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$w_{\text{с}} = \frac{v_{\text{с}}}{0.785 \cdot d_{\text{вн}}^2 \cdot n_{\text{мр}}} = \frac{2,139 \cdot 10^{-3}}{0,785 \cdot 0,081^2 \cdot 22} = 0,019 \text{ м/сек}$$

$$\text{Re} = \frac{w_{\text{с}} \cdot d_{\text{вн}} \cdot \rho_{\text{с}}}{\mu_{\text{с}}} = \frac{0,019 \cdot 0,081 \cdot 996}{804 \cdot 10^{-6}} = 1,888 \cdot 10^3$$

Знайдемо швидкість і критерій Рейнольдса для мулової суміші, за умови, що субстрат переміщується з частотою $n = 0,5 \text{ об/сек.}$, діаметр кола, що описує перемішуючий пристрій в процесі обертання становить $d_{\text{м}} = 4,4 \text{ м}$:

$$w_{\text{с}} = \frac{v_{\text{с}}}{S} = \frac{4 \cdot v_{\text{с}}}{\pi \cdot D^2} = \frac{4 \cdot 1,033 \cdot 10^{-3}}{3,14 \cdot 4,5^2} = 6,2 \cdot 10^{-5} \text{ м/сек}$$

$$\text{Re} = \frac{n \cdot d_{\text{м}}^2 \cdot \rho_{\text{с}}}{\mu_{\text{с}}} = \frac{0,1 \cdot 4,2^2 \cdot 1020}{760,9 \cdot 10^{-6}} = 2,365 \cdot 10^6$$

Критерій Нуссельта для води

$$Nu_{\text{с}} = 0,8 \left(Pe_{\text{с}} \left(\frac{d_{\text{вн}}}{l} \right) \right)^{0,4} (Gr_{\text{с}} \cdot Pr_{\text{с}})^{0,1} \left(\frac{\mu_{\text{с}}}{\mu_{\text{сст}}} \right)^{0,14}$$

В рівнянні

$$Pr_{\text{с}} = \frac{c_{\text{с}} \cdot \mu_{\text{с}}}{\lambda_{\text{с}}} = \frac{4180 \cdot 804 \cdot 10^{-6}}{0,618} = 5,438 - \text{критерій Прандтля};$$

$$Gr_{\text{с}} = \beta \cdot \Delta t \cdot \frac{g \cdot d_{\text{вн}}^3}{\nu_{\text{с}}^2} = 3,21 \cdot 10^{-4} \cdot 25 \cdot \frac{9,81 \cdot 0,081^3}{8,072 \cdot 10^{-7}} = 6,534 \cdot 10^7 - \text{критерій Грасгофа},$$

де $\beta = 3,21 \cdot 10^{-4} \text{ К}^{-1}$ – коефіцієнт об'ємного розширення води при $30 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $\Delta t = 55 - 30 = 25 \text{ }^{\circ}\text{C}$ – різниця температур між стінкою і рідиною, $\nu_{\text{с}}$ - коефіцієнт в'язкості кінематичний:

$$\nu_{\text{с}} = \frac{\mu_{\text{с}}}{\rho_{\text{с}}} = \frac{804 \cdot 10^{-6}}{1020} = 8,072 \cdot 10^{-7} \text{ м}^3/\text{сек};$$

$\mu_{\text{сст.}} = 630 \text{ Па}\cdot\text{с}$ - динамічний коефіцієнт в'язкості води при температурі стінки ($t_{\text{ст}} = \frac{55 + 30}{2} = 42,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$)

					Б/11.03.61033.000-40 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$Pe_e = Re_e \cdot Pr_e = 1,888 \cdot 10^3 \cdot 5,438 = 1,027 \cdot 10^4 - \text{критерій Пекле.}$$

Тоді

$$\begin{aligned} Nu_e &= 0,8 \left(Pe_e \left(\frac{d_{\text{вн}}}{l} \right) \right)^{0,4} \cdot (Gr_e \cdot Pr_e)^{0,1} \left(\frac{\mu_e}{\mu_{e\text{см}}} \right)^{0,14} = \\ &= 0,8 \left(1,027 \cdot 10^4 \cdot \left(\frac{0,081}{4,4} \right) \right)^{0,4} \cdot (6,534 \cdot 10^7 \cdot 5,348)^{0,1} \left(\frac{804 \cdot 10^{-6}}{630 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,14} = \\ &= 54,6 \end{aligned}$$

Коефіцієнт тепловіддачі від води до стінки труби

$$\alpha_e = \frac{Nu_e \cdot \lambda_e}{d_e} = \frac{54,6 \cdot 0,618}{0,081} = 414 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$$

Критерій Нуссельта для субстрату:

$$Nu_c = 0,87 \cdot Re_c^{0,62} \cdot Pr_c^{0,33} \left(\frac{\mu_c}{\mu_{c\text{см}}} \right)^{0,14} \cdot \Gamma^{-1}$$

В рівнянні

$\mu_c = \mu_e \cdot (1 + 4,5 \cdot \varphi) = 559,5 \cdot 10^{-6} (1 + 4,5 \cdot 0,08) = 7,609 \cdot 10^{-4} \text{ Па} \cdot \text{с}$ - динамічний коефіцієнт в'язкості субстрату (в даному рівнянні застосований динамічний коефіцієнт в'язкості води при температурі субстрату $t = 55^\circ \text{C}$ $\mu_{e.} = 559,5 \text{ Па} \cdot \text{с}$)

$\varphi = 8\%$ - концентрація твердих зважених частинок.

$\mu_{c\text{см}} = \mu_{e\text{см}} \cdot (1 + 4,5 \cdot \varphi) = 630 \cdot 10^{-6} (1 + 4,5 \cdot 0,08) = 8,568 \cdot 10^{-4} \text{ Па} \cdot \text{с}$ - динамічний коефіцієнт в'язкості субстрату біля стінки (в даному рівнянні застосований динамічний коефіцієнт в'язкості води при температурі стінки $t = 42,5^\circ \text{C}$ $\mu_{e.} = 630 \text{ Па} \cdot \text{с}$)

$$\Gamma = \frac{D}{d_m} = \frac{4,6}{4,4} = 1,045 - \text{геометричний симплекс подібності.}$$

$$Pr_c = \frac{c_c \cdot \mu_c}{\lambda_c} = \frac{3500 \cdot 760,9 \cdot 10^{-6}}{0,6} = 4,439 - \text{критерій Прандтля;}$$

					Б/11.03.61033.000-40 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Тоді

$$\begin{aligned}Nu_c &= 0,87 \cdot Re_c^{0,62} \cdot Pr_c^{0,33} \left(\frac{\mu_c}{\mu_{cm}} \right)^{0,14} \cdot \Gamma^{-1} = \\&= 0,87 \cdot (2,365 \cdot 10^6)^{0,62} \cdot 4,439^{0,33} \cdot \left(\frac{760,9 \cdot 10^{-4}}{856,8 \cdot 10^{-4}} \right)^{0,14} \cdot \left(\frac{4,6}{4,4} \right)^{-1} = \\&= 1,27 \cdot 10^4\end{aligned}$$

Коефіцієнт тепловіддачі від субстрату до стінки труби

$$\alpha_c = \frac{Nu_c \cdot \lambda_c}{d_e} = \frac{1,27 \cdot 10^4 \cdot 0,6}{3,5} = 2 \cdot 10^3 \text{ Bm} / \text{м}^2 \cdot K$$

Коефіцієнт теплопередачі

$$k = \frac{1}{\left(\frac{1}{\alpha_s} \right) + \left(\frac{\delta_{cm}}{\lambda_{cm}} \right) + \left(\frac{1}{\alpha_c} \right)} = \frac{1}{\left(\frac{1}{414} \right) + \left(\frac{0,0035}{24,7} \right) + \left(\frac{1}{2 \cdot 10^3} \right)} = 412 \text{ Bm} / \text{м}^2 \cdot K$$

Визначимо остаточно площу теплообміну:

$$F = \frac{Q_c}{k \cdot \Delta t} = \frac{6,27 \cdot 10^4}{412 \cdot 13} = 12,6 \text{ м}^2$$

Загальна довжина труб

$$L = \frac{2F}{\pi(d_{зov} + d_{en})} = \frac{2 \cdot 12,6}{3,14(0,0885 + 0,0081)} = 47 \text{ м}$$

Кількість труб

$$n_{mp} = \frac{L}{l} = \frac{47}{3,5} = 13,5$$

Кількість труб в одній секції

$$n = \frac{n_{mp}}{3} = \frac{13,5}{3} \approx 5$$

Остаточно для даного випадку приймаємо 3 секції по 5 труб в кожній.

2. Теплота реакції складає 20% від теплоти субстрату.

					Б/11.03.61033.000-40 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$Q_p = 0,2Q_c = 0,2 \cdot 9,65 \cdot 10^4 = 1,93 \cdot 10^4 \text{ Вт}$$

Тоді з матеріального балансу

$$Q_{\text{в1}} = \frac{Q_c + Q_p}{1,03} - Q_c = \frac{8,86 \cdot 10^4}{1,03} - 377 = 8,5 \cdot 10^4 \text{ Вт}$$

Прийmemo як і в попередньому випадку $\Delta t_{\text{с}} = 5 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Теплоємність води приймаємо $c_{\text{с}} = 4180 \text{ Дж/кг}\cdot\text{K}$.

Витрати води на охолодження тоді

$$G_{\text{с}} = \frac{Q_{\text{с}}}{c_{\text{с}} \cdot \Delta t_{\text{с}}} = \frac{8,5 \cdot 10^4}{4180 \cdot 5} = 4,06 \text{ кг/сек}$$

Прийmemo аналогічно попередньому початкову температуру води $t_n = 30 \text{ }^{\circ}\text{C}$, кінцеву - $t_k = 35 \text{ }^{\circ}\text{C}$ і відповідно аналогічні її характеристики.

Об'ємні витрати води становлять

$$v_{\text{с}} = \frac{G_{\text{с}}}{\rho_{\text{с}}} = \frac{4,06}{996} = 4,07 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{сек}$$

Середня різниця температур, що входить у рівняння теплопередачі, для змішаного току теплоносіїв визначається аналогічно:

$$\Delta t_{\text{сеп}} = \varepsilon_{\Delta t} \cdot \Delta t_{\text{np}} = 0,95 \cdot 13 = 12,4 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Прийmemo попередньо коефіцієнт теплопередачі $k = 365 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{K)}$.

Орієнтовна площа теплообміну в цьому випадку становить

$$F_{\text{оп}} = \frac{Q_c}{k \cdot \Delta t_{\text{сеп}}} = \frac{9,65 \cdot 10^4}{365 \cdot 12,4} = 21,3 \text{ м}^2$$

Із міркувань порівняльного аналізу всі параметри труби залишаємо з попередніх розрахунків.

Орієнтовна загальна довжина труби

					Б/11.03.61033.000-40 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$L_{op} = \frac{2F_{op}}{\pi(d_{зоб} + d_{вн})} = \frac{2 \cdot 23,3}{3,14(0,0885 + 0,0081)} = 87 \text{ м}$$

Довжина однієї труби становить $l = 3,5 \text{ м}$.

Тоді орієнтовна кількість труб

$$n_{тр} = \frac{L}{l} = \frac{87}{3,5} = 25$$

Передбачаємо в апараті три теплообмінні секції по 8 труб в кожній.

Для забезпечення турбулентного режиму течії в трубах, швидкість течії води повинна бути більшою, ніж

$$w = \frac{1000 \cdot \mu_{\text{в}}}{d_{\text{вн}} \cdot \rho_{\text{в}}} = \frac{1000 \cdot 804 \cdot 10^{-6}}{0,081 \cdot 996} = 0,01 \text{ м/сек}$$

Знайдемо швидкість і критерій Рейнольдса для води для заданих умов:

$$w_{\text{в}} = \frac{v_{\text{в}}}{0,785 \cdot d_{\text{вн}}^2 \cdot n_{тр}} = \frac{2,569 \cdot 10^{-3}}{0,785 \cdot 0,081^2 \cdot 26} = 0,019 \text{ м/сек}$$

$$\text{Re} = \frac{w_{\text{в}} \cdot d_{\text{вн}} \cdot \rho_{\text{в}}}{\mu_{\text{в}}} = \frac{0,019 \cdot 0,081 \cdot 996}{804 \cdot 10^{-6}} = 1,89 \cdot 10^3$$

Швидкість і критерій Рейнольдса для мулової суміші залишаються незмінними

$$w_{\text{с}} = \frac{v_{\text{с}}}{S} = \frac{4 \cdot v_{\text{с}}}{\pi \cdot D^2} = \frac{4 \cdot 1,033 \cdot 10^{-3}}{3,14 \cdot 4,5^2} = 6,216 \cdot 10^{-5} \text{ м/сек}$$

$$\text{Re} = \frac{n \cdot d_{\text{м}}^2 \cdot \rho_{\text{с}}}{\mu_{\text{с}}} = \frac{0,1 \cdot 4,2^2 \cdot 1020}{760,9 \cdot 10^{-6}} = 2,36 \cdot 10^6$$

Критерій Нуссельта для води

$$Nu_{\text{в}} = 0,8 \left(Pe_{\text{в}} \left(\frac{d_{\text{вн}}}{l} \right) \right)^{0,4} (Gr_{\text{в}} \cdot Pr_{\text{в}})^{0,1} \left(\frac{\mu_{\text{в}}}{\mu_{\text{всм}}} \right)^{0,14}$$

					Б/11.03.61033.000-40 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

В рівнянні

$$Pr_{\epsilon} = \frac{c_{\epsilon} \cdot \mu_{\epsilon}}{\lambda_{\epsilon}} = \frac{4180 \cdot 804 \cdot 10^{-6}}{0,618} = 5,438 - \text{критерій Прандтля};$$

$$Gr_{\epsilon} = \beta \cdot \Delta t \cdot \frac{g \cdot d_{\text{вн}}^3}{\nu_{\epsilon}^2} = 3,21 \cdot 10^{-4} \cdot 25 \cdot \frac{9,81 \cdot 0,081^3}{8,072 \cdot 10^{-7}} = 6,534 \cdot 10^7 - \text{критерій Грасгофа},$$

де $\beta = 3,21 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ – коефіцієнт об'ємного розширення води при 30°C ,
 $\Delta t = 55 - 30 = 25^{\circ}\text{C}$ – різниця температур між стінкою і рідиною, ν_{ϵ} –
кінематичний коефіцієнт в'язкості:

$$\nu_{\epsilon} = \frac{\mu_{\epsilon}}{\rho_{\epsilon}} = \frac{804 \cdot 10^{-6}}{1020} = 8,072 \cdot 10^{-7} \text{ м}^3/\text{сек};$$

$\mu_{\epsilon \text{ ст.}} = 630 \text{ Па} \cdot \text{с}$ - динамічний коефіцієнт в'язкості води при температурі
стінки ($t_{\text{ст}} = \frac{55+30}{2} = 42,5^{\circ}\text{C}$)

$$Pe_{\epsilon} = Re_{\epsilon} \cdot Pr_{\epsilon} = 1,89 \cdot 10^3 \cdot 5,438 = 1,028 \cdot 10^4 - \text{критерій Пекле}.$$

Тоді

$$\begin{aligned} Nu_{\epsilon} &= 0,8 \left(Pe_{\epsilon} \left(\frac{d_{\text{вн}}}{l} \right) \right)^{0,4} \cdot (Gr_{\epsilon} \cdot Pr_{\epsilon})^{0,1} \left(\frac{\mu_{\epsilon}}{\mu_{\epsilon \text{ ст}}} \right)^{0,14} = \\ &= 0,8 \left(1,028 \cdot 10^4 \cdot \left(\frac{0,081}{4,4} \right) \right)^{0,4} \cdot (6,534 \cdot 10^7 \cdot 5,348)^{0,1} \left(\frac{804 \cdot 10^{-6}}{630 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,14} = \\ &= 54,6 \end{aligned}$$

Коефіцієнт тепловіддачі від води до стінки труби

$$\alpha_{\epsilon} = \frac{Nu_{\epsilon} \cdot \lambda_{\epsilon}}{d_e} = \frac{54,6 \cdot 0,618}{0,081} = 414 \text{ Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{К}$$

Критерій Нуссельта для субстрату:

$$Nu_c = 0,87 \cdot Re_c^{0,62} \cdot Pr_c^{0,33} \left(\frac{\mu_c}{\mu_{c \text{ ст}}} \right)^{0,14} \cdot \Gamma^{-1}$$

					Б/11.03.61033.000-40 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

В рівнянні

$\mu_c = \mu_{\text{в}} \cdot (1 + 4,5 \cdot \varphi) = 559,5 \cdot 10^{-6} (1 + 4,5 \cdot 0,08) = 7,609 \cdot 10^{-4} \text{ Па} \cdot \text{с}$ - динамічний коефіцієнт в'язкості субстрату (в даному рівнянні здійснений динамічний коефіцієнт в'язкості води при температурі субстрату $t = 55^\circ \text{C}$ $\mu_{\text{в}} = 559,5 \text{ Па} \cdot \text{с}$)

$\mu_{c \text{ ст}} = \mu_{\text{в ст}} \cdot (1 + 4,5 \cdot \varphi) = 630 \cdot 10^{-6} (1 + 4,5 \cdot 0,08) = 8,568 \cdot 10^{-4} \text{ Па} \cdot \text{с}$ - динамічний коефіцієнт в'язкості субстрату біля стінки (в даному рівнянні здійснений динамічний коефіцієнт в'язкості води при температурі стінки $t = 42,5^\circ \text{C}$ $\mu_{\text{в}} = 630 \text{ Па} \cdot \text{с}$)

$$\Gamma = \frac{D}{d_{\text{м}}} = \frac{4,6}{4,4} = 1,045 - \text{геометричний симплекс подібності.}$$

$$Pr_c = \frac{c_c \cdot \mu_c}{\lambda_c} = \frac{3500 \cdot 760,9 \cdot 10^{-6}}{0,6} = 4,439 - \text{критерій Прандтля;}$$

Тоді

$$\begin{aligned} Nu_c &= 0,87 \cdot Re_c^{0,62} \cdot Pr_c^{0,33} \left(\frac{\mu_c}{\mu_{c \text{ ст}}} \right)^{0,14} \cdot \Gamma^{-1} = \\ &= 0,87 \cdot (2,36 \cdot 10^6)^{0,62} \cdot 4,439^{0,33} \cdot \left(\frac{760,9 \cdot 10^{-4}}{856,8 \cdot 10^{-4}} \right)^{0,14} \cdot \left(\frac{4,6}{4,4} \right)^{-1} = \\ &= 1,27 \cdot 10^4 \end{aligned}$$

Коефіцієнт тепловіддачі від субстрату до стінки труби залишається аналогічним

$$\alpha_c = \frac{Nu_c \cdot \lambda_c}{d_e} = \frac{1,27 \cdot 10^4 \cdot 0,6}{3,5} = 2 \cdot 10^3 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$$

Коефіцієнт теплопередачі

$$k = \frac{1}{\left(\frac{1}{\alpha_{\text{в}}} \right) + \left(\frac{\delta_{\text{ст}}}{\lambda_{\text{ст}}} \right) + \left(\frac{1}{\alpha_c} \right)} = \frac{1}{\left(\frac{1}{414} \right) + \left(\frac{0,0035}{24,7} \right) + \left(\frac{1}{2 \cdot 10^3} \right)} = 417 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$$

					Б/11.03.61033.000-40 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Визначимо остаточно площу теплообміну:

$$F = \frac{Q_c}{k \cdot \Delta t} = \frac{9,65 \cdot 10^4}{417 \cdot 12} = 22,3 \text{ м}^2$$

Загальна довжина труб

$$L = \frac{2F}{\pi(d_{\text{зов}} + d_{\text{вн}})} = \frac{2 \cdot 22,3}{3,14(0,0885 + 0,0081)} = 83,5 \text{ м}$$

Кількість труб

$$n_{\text{тр}} = \frac{L}{l} = \frac{83,5}{3,5} = 24$$

Кількість труб в одній секції

$$n = \frac{n_{\text{тр}}}{3} = \frac{24}{3} = 8$$

Остаточно для даного випадку приймаємо 3 секції по 8 труб в кожній.

3. Теплота реакції відсутня, теплота субстрату зменшується на 20%

Тоді з матеріального балансу

$$Q_{\text{с1}} = \frac{Q_c - 0,2 \cdot Q_c}{1,03} - Q_e = \frac{5,9 \cdot 10^4}{1,03} - 377 = 5,691 \cdot 10^4 \text{ Вт}$$

Прийmemo як і в попередніх випадках $\Delta t_{\text{с}} = 8 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Теплоємність води приймаємо $c_{\text{с}} = 4180 \text{ Дж/кг} \cdot \text{K}$.

Витрати води на охолодження тоді

$$G_{\text{с}} = \frac{Q_{\text{с}}}{c_{\text{с}} \cdot \Delta t_{\text{с}}} = \frac{5,691 \cdot 10^4}{4180 \cdot 8} = 1,702 \text{ кг/сек}$$

Прийmemo аналогічно попередньому початкову температуру води $t_n = 30 \text{ }^{\circ}\text{C}$, кінцеву - $t_k = 35 \text{ }^{\circ}\text{C}$ і відповідно аналогічні її характеристики.

Об'ємні витрати води становлять

					Б/11.03.61033.000-40 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$v_{\text{в}} = \frac{G_{\text{в}}}{\rho_{\text{в}}} = \frac{1,702}{996} = 1,709 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{сек}$$

Середня різниця температур, що входить у рівняння теплопередачі, для змішаного току теплоносіїв визначається аналогічно:

$$\Delta t_{\text{сер}} = \varepsilon_{\Delta t} \cdot \Delta t_{\text{нр}} = 0,95 \cdot 13 = 12 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Приймемо попередньо коефіцієнт теплопередачі $k = 360 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

Орієнтовна площа теплообміну в цьому випадку становить

$$F_{\text{оп}} = \frac{Q_{\text{с}}}{k \cdot \Delta t_{\text{сер}}} = \frac{5,9 \cdot 10^4}{365 \cdot 9,857} = 16,4 \text{ м}^2$$

Із міркувань порівняльного аналізу всі параметри труби залишаємо з попередніх розрахунків.

Орієнтовна загальна довжина труби

$$L_{\text{оп}} = \frac{2F_{\text{оп}}}{\pi(d_{\text{зов}} + d_{\text{вн}})} = \frac{2 \cdot 16,4}{3,14(0,0885 + 0,0081)} = 61,414 \text{ м}$$

Довжина однієї труби становить $l = 3,5 \text{ м}$.

Тоді орієнтовна кількість труб

$$n_{\text{тр}} = \frac{L}{l} = \frac{61,414}{3,5} = 17,547 \approx 18$$

Передбачаємо в апараті три теплообмінні секції по 8 труб в кожній.

Для забезпечення турбулентного режиму течії в трубах, швидкість течії води повинна бути більшою, ніж

$$w = \frac{1000 \cdot \mu_{\text{в}}}{d_{\text{вн}} \cdot \rho_{\text{в}}} = \frac{1000 \cdot 804 \cdot 10^{-6}}{0,081 \cdot 996} = 0,01 \text{ м}/\text{сек}$$

Знайдемо швидкість і критерій Рейнольдса для води для заданих умов:

					Б/11.03.61033.000-40 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$w_{\text{г}} = \frac{v_{\text{г}}}{0.785 \cdot d_{\text{вн}}^2 \cdot n_{\text{мр}}} = \frac{1,709 \cdot 10^{-3}}{0,785 \cdot 0,081^2 \cdot 18} = 0,019 \text{ м/сек}$$

$$\text{Re} = \frac{w_{\text{г}} \cdot d_{\text{вн}} \cdot \rho_{\text{г}}}{\mu_{\text{г}}} = \frac{0,019 \cdot 0,081 \cdot 996}{804 \cdot 10^{-6}} = 1,886 \cdot 10^3$$

Швидкість і критерій Рейнольдса для мулової суміші залишаються незмінними

$$w_{\text{с}} = \frac{v_{\text{с}}}{S} = \frac{4 \cdot v_{\text{с}}}{\pi \cdot D^2} = \frac{4 \cdot 1,033 \cdot 10^{-3}}{3,14 \cdot 4,6^2} = 6,216 \cdot 10^{-5} \text{ м/сек}$$

$$\text{Re} = \frac{n \cdot d_{\text{м}}^2 \cdot \rho_{\text{с}}}{\mu_{\text{с}}} = \frac{0,1 \cdot 4,2^2 \cdot 1020}{760,9 \cdot 10^{-6}} = 2,36 \cdot 10^6$$

Критерій Нуссельта для води

$$Nu_{\text{г}} = 0,8 \left(Pe_{\text{г}} \left(\frac{d_{\text{вн}}}{l} \right) \right)^{0,4} (Gr_{\text{г}} \cdot Pr_{\text{г}})^{0,1} \left(\frac{\mu_{\text{г}}}{\mu_{\text{гст}}} \right)^{0,14}$$

В рівнянні

$$Pr_{\text{г}} = \frac{c_{\text{г}} \cdot \mu_{\text{г}}}{\lambda_{\text{г}}} = \frac{4180 \cdot 804 \cdot 10^{-6}}{0,618} = 5,438 - \text{критерій Прандтля};$$

$$Gr_{\text{г}} = \beta \cdot \Delta t \cdot \frac{g \cdot d_{\text{вн}}^3}{\nu_{\text{г}}^2} = 3,21 \cdot 10^{-4} \cdot 25 \cdot \frac{9,81 \cdot 0,081^3}{8,072 \cdot 10^{-7}} = 6,534 \cdot 10^7 - \text{критерій Грасгофа},$$

де $\beta = 3,21 \cdot 10^{-4} \text{ К}^{-1}$ – коефіцієнт об'ємного розширення води при $30 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $\Delta t = 55 - 30 = 25 \text{ }^{\circ}\text{C}$ – різниця температур між стінкою і рідиною, $\nu_{\text{г}}$ – кінематичний коефіцієнт в'язкості:

$$\nu_{\text{г}} = \frac{\mu_{\text{г}}}{\rho_{\text{г}}} = \frac{804 \cdot 10^{-6}}{1020} = 8,072 \cdot 10^{-7} \text{ м}^3/\text{сек};$$

$\mu_{\text{гст}} = 630 \text{ Па} \cdot \text{с}$ - динамічний коефіцієнт в'язкості води при температурі стінки ($t_{\text{ст}} = \frac{55 + 30}{2} = 42,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$)

					Б/11.03.61033.000-40 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$Pe_{\epsilon} = Re_{\epsilon} \cdot Pr_{\epsilon} = 1,886 \cdot 10^3 \cdot 5,438 = 1,025 \cdot 10^4 - \text{критерій Пекле.}$$

Тоді

$$\begin{aligned} Nu_{\epsilon} &= 0,8 \left(Pe_{\epsilon} \left(\frac{d_{\text{вн}}}{l} \right) \right)^{0,4} \cdot (Gr_{\epsilon} \cdot Pr_{\epsilon})^{0,1} \left(\frac{\mu_{\epsilon}}{\mu_{\epsilon \text{ см}}} \right)^{0,14} = \\ &= 0,8 \left(1,025 \cdot 10^4 \cdot \left(\frac{0,081}{4,4} \right) \right)^{0,4} \cdot (6,534 \cdot 10^7 \cdot 5,348)^{0,1} \left(\frac{804 \cdot 10^{-6}}{630 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,14} = \\ &= 54,577 \end{aligned}$$

Коефіцієнт тепловіддачі від води до стінки труби

$$\alpha_{\epsilon} = \frac{Nu_{\epsilon} \cdot \lambda_{\epsilon}}{d_{\epsilon}} = \frac{54,577 \cdot 0,618}{0,081} = 413,85 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$$

Критерій Нуссельта для субстрату:

$$Nu_c = 0,87 \cdot Re_c^{0,62} \cdot Pr_c^{0,33} \left(\frac{\mu_c}{\mu_{c \text{ см}}} \right)^{0,14} \cdot \Gamma^{-1}$$

В рівнянні

$\mu_c = \mu_{\epsilon} \cdot (1 + 4,5 \cdot \varphi) = 559,5 \cdot 10^{-6} (1 + 4,5 \cdot 0,08) = 7,609 \cdot 10^{-4} \text{ Па} \cdot \text{с}$ - динамічний коефіцієнт в'язкості субстрату (в данному рівнянні здійснений динамічний коефіцієнт в'язкості води при температурі субстрату $t = 55^{\circ}\text{C}$ $\mu_{\epsilon} = 559,5 \text{ Па} \cdot \text{с}$)

$\mu_{c \text{ см}} = \mu_{\epsilon \text{ см}} \cdot (1 + 4,5 \cdot \varphi) = 630 \cdot 10^{-6} (1 + 4,5 \cdot 0,08) = 8,568 \cdot 10^{-4} \text{ Па} \cdot \text{с}$ - динамічний коефіцієнт в'язкості субстрату біля стінки (в данному рівнянні здійснений динамічний коефіцієнт в'язкості води при температурі стінки $t = 42,5^{\circ}\text{C}$ $\mu_{\epsilon} = 630 \text{ Па} \cdot \text{с}$)

$$\Gamma = \frac{D}{d_m} = \frac{4,6}{4,4} = 1,045 - \text{геометричний симплекс подібності.}$$

					Б/11.03.61033.000-40 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$Pr_c = \frac{c_c \cdot \mu_c}{\lambda_c} = \frac{3500 \cdot 760,9 \cdot 10^{-6}}{0,6} = 4,439 - \text{критерій Прандтля};$$

Тоді

$$\begin{aligned} Nu_c &= 0,87 \cdot Re_c^{0,62} \cdot Pr_c^{0,33} \left(\frac{\mu_c}{\mu_{c,cm}} \right)^{0,14} \cdot \Gamma^{-1} = \\ &= 0,87 \cdot (2,36 \cdot 10^6)^{0,62} \cdot 4,439^{0,33} \cdot \left(\frac{760,9 \cdot 10^{-4}}{856,8 \cdot 10^{-4}} \right)^{0,14} \cdot \left(\frac{4,6}{4,4} \right)^{-1} = \\ &= 1,27 \cdot 10^4 \end{aligned}$$

Коефіцієнт тепловіддачі від субстрату до стінки труби залишається аналогічним

$$\alpha_c = \frac{Nu_c \cdot \lambda_c}{d_e} = \frac{1,27 \cdot 10^4 \cdot 0,6}{3,5} = 2 \cdot 10^3 \text{ Bm} / \text{m}^2 \cdot K$$

Коефіцієнт теплопередачі

$$k = \frac{1}{\left(\frac{1}{\alpha_s} \right) + \left(\frac{\delta_{cm}}{\lambda_{cm}} \right) + \left(\frac{1}{\alpha_c} \right)} = \frac{1}{\left(\frac{1}{413,85} \right) + \left(\frac{0,0035}{24,7} \right) + \left(\frac{1}{2 \cdot 10^3} \right)} = 416,6 \text{ Bm} / \text{m}^2 \cdot K$$

Визначимо остаточно площу теплообміну:

$$F = \frac{Q_c}{k \cdot \Delta t} = \frac{5,9 \cdot 10^4}{416,6 \cdot 12,4} = 9,68 \text{ м}^2$$

Загальна довжина труб

$$L = \frac{2F}{\pi (d_{зов} + d_{вн})} = \frac{2 \cdot 9,68}{3,14(0,0885 + 0,0081)} = 36 \text{ м}$$

Кількість труб

$$n_{mp} = \frac{L}{l} = \frac{36}{3,5} = 10,5 \approx 11$$

					Б/11.03.61033.000-40 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Кількість труб в одній секції

$$n = \frac{n_{mp}}{3} = \frac{11}{3} = 3,37$$

Остаточно для даного випадку приймаємо 3 секції по 4 труб в кожній.

Дані розрахунки були проведені з метою з'ясування площі теплообміну.

В результаті розрахунків, беручи до уваги, що при розрахунках довжиною з'єднувальних труб зневажали, приймаємо остаточно 3 секції по 8 труб (7 горизонтальних і 1 вертикальна).

7.3 Розрахунок теплової ізоляції

Метою даного розрахунку є визначення необхідної товщини теплоізоляційного шару, що забезпечує зменшення тепловтрат до допустимого рівня при експлуатації апарата в заданих температурних умовах.

Вихідні дані для розрахунку:

- $R = 2,75 \text{ м}$ - радіус апарату;
- $L = 9 \text{ м}$ – довжина циліндричної частини апарату;
- $t = 38 \text{ }^{\circ}\text{C}$ – температура перетікання процесу метаностворення.

З теплового розрахунку відома величина теплових втрат

$$Q_n = 3,37 \cdot 10^3 \text{ Вт}$$

Площа поверхні апарату становить

$$S = 2\pi RL = 2 \cdot 3,14 \cdot 2,75 \cdot 9 = 155,5 \text{ м}^2$$

Питомі втрати теплоти з одиниці поверхні апарату

					Б/11.03.61033.000-40 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$q = \frac{Q_n}{S} = \frac{3,37 \cdot 10^3}{155,5} = 21,7 \text{ Вт/м}^2$$

Матеріал ізоляції – мінеральне волокно. Коефіцієнт теплопровідності матеріалу- $\lambda = 0,048 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$.

Прийmemo середню температуру повітря в літній період $t_1 = 20^\circ \text{C}$, в зимовий період - $t_2 = -5^\circ \text{C}$

Тоді товщина ізоляції:

- в літній період

$$\delta_1 = \frac{\lambda \cdot (t - t_1)}{q} = \frac{0,048 \cdot (38 - 20)}{21,7} = 0,04 \text{ м}$$

- в зимовий період

$$\delta_2 = \frac{\lambda \cdot (t - t_2)}{q} = \frac{0,048 \cdot (38 + 5)}{21,7} = 0,095 \text{ м}$$

7.4 Вибір основних параметрів апарату

Метою даного розрахунку є визначення основних геометричних характеристик апарата (діаметра, висоти циліндричної частини тощо) на основі заданого об'ємного значення, з урахуванням конструктивних та експлуатаційних вимог.

Виходимо з того, що об'єм апарату повинен становити $V = 150 \text{ м}^3$.

Попередньо прийmemo довжину циліндричної обичайки рівною $L = 9 \text{ м}$.

Тоді радіус апарату

$$R = \sqrt{\frac{V}{\pi L}} = \sqrt{\frac{150}{3,14 \cdot 9}} = 2,3 \text{ м}$$

Прийmemo для апарату три сідлові опори.

					Б/11.03.61033.000-40 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Відстань між опорами приймемо рівною

$$l = 3,3 \text{ м}$$

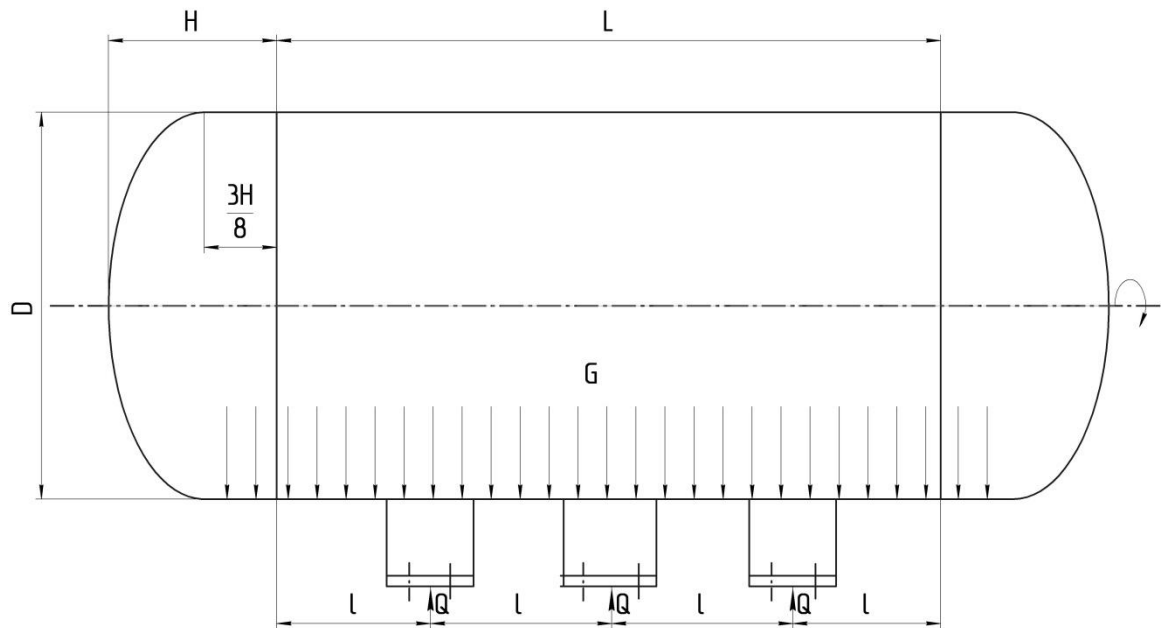


Рис. 3.2. Розрахункова схема апарату

7.5 Розрахунок циліндричної обичайки

Метою даного розрахунку є визначення необхідної товщини стінки циліндричної обичайки горизонтального апарату, який експлуатується під дією внутрішнього надлишкового тиску, з урахуванням вимог міцності та надійності конструкції.

Вихідні дані для розрахунку:

- матеріал обичайки – аустенітна сталь 08X18H10T, ГОСТ 5632 – 92;
- допустиме напруження при температурі $t = 38 \text{ }^{\circ}\text{C}$, при якій відбувається

процес метаностворення, $[\sigma_s] = \frac{\sigma_s}{n} = \frac{134}{1,5} = 88 \text{ МПа}$, де $n = 1,5$ – коефіцієнт запасу;

					Б/11.03.61033.000-40 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- модуль повздовжньої пружності для даного матеріалу за даних умов
 $E = 2 \cdot 10^5 \text{ МПа};$

- середовище – органічні відходи, які включають в свій склад каналізаційні відходи міста а також органічні відходи з міських звалищ.

- тиск в апараті $P = 0,2 \text{ МПа}.$

- внутрішній діаметр обичайки $D_{\text{вн}} = 4,5 \text{ м},$ довжина обичайки $L = 9 \text{ м}.$

- відстань між опорами апарату $l = 3,3 \text{ м};$

- попередньо приймаємо вагу заповненого апарату рівною $G = 2 \text{ Мн}.$

обичайка з неукріпленими отворами, що розташовані по одній твірній
($d_1 = 0,115 \text{ м}, d_2 = 1,225 \text{ м}, d_3 = 0,81 \text{ м}, d_4 = 0,75 \text{ м}$)

Розрахунковий коефіцієнт міцності обичайки в повздовжньому напрямку:

$$\varphi = \frac{L - (d_1 + d_2 + d_3 + d_4)}{L} = \frac{9 - (0,115 + 1,225 + 0,81 + 0,76)}{9} = 0,677$$

Розрахункову товщину стінки обичайки визначимо за формулою:

$$s' = \frac{D_{\text{вн}} p}{2 \cdot [\sigma] \varphi - p} + C$$

Оскільки $\frac{[\sigma]}{p} \varphi = 297,7 > 50,$ величиною p в знаменнику зневажаємо.

Тоді

$$s' = \frac{D_{\text{вн}} p}{2 \cdot [\sigma] \varphi} + C = \frac{4,5 \cdot 0,2}{2 \cdot 88 \cdot 0,677} + 0,0026 = 0,01 \text{ м}$$

- де $C = C_1 + C_2 + C_3$ - прибавка до розрахункової товщини, яка складається з $C_1 = 2 \text{ мм}$ – прибавка на корозію матеріалу; $C_2 = 0,6 \text{ мм}$ – прибавка на компенсацію мінусового відхилення товщини листа; $C_3 = 0$ – технологічна прибавка.

Приймаємо попередньо $s = 10 \text{ мм}.$

					Б/11.03.61033.000-40 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Перевіримо напруження в стінці обичайки при гідравлічних випробуваннях апарату водою.

Гідростатичний тиск у верхній, послабленій отворами частині обичайки, дорівнює нулю, тому його не враховуємо.

Приймаємо розрахунковий тиск при випробуваннях:

$$p_{випр} = 1,5 \cdot p = 1,5 \cdot 0,2 = 0,3 \text{ МПа}$$

Напруження в стінці обичайки при гідравлічних випробуваннях апарату

$$\sigma_{випр} = \frac{(D_{вн} + (s - C)) p_{випр}}{2(s - C)\phi} = \frac{(4,5 + (0,01 - 0,0026) \cdot 0,3}{2 \cdot (0,01 - 0,0026) \cdot 0,677} = 125,7 \text{ МПа}$$

$\sigma_{випр} = 125,7 \text{ МПа} > [\sigma] = 88 \text{ МПа}$ - умова міцності не виконується. Тому маємо збільшити товщину стінки. Приймаємо $s = 0,018 \text{ м}$.

Перерахуємо напруження в стінці обичайки при гідравлічних випробуваннях апарату

$$\sigma_{випр} = \frac{(D_{вн} + (s - C)) p_{випр}}{2(s - C)\phi} = \frac{(4,5 + (0,018 - 0,0026) \cdot 0,3}{2 \cdot (0,018 - 0,0026) \cdot 0,677} = 63 \text{ МПа}$$

$\sigma_{випр} = 63 \text{ МПа} > [\sigma] = 88 \text{ МПа}$ - умова міцності виконується.

Перевіримо обичайку на напруження в її стінці від дії вигинаючого моменту (сили тяжіння апарату з субстратом). Максимальний вигинаючий момент для небезпечного перетину обичайки (посередині між опорами), вважаючи приблизно навантаження G рівномірно розподіленим по довжині корпусу, буде дорівнювати:

$$M = \frac{G \cdot l^2}{4} = \frac{2 \cdot 10^6 \cdot 3,3^2}{4} = 4,7 \cdot 10^6 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Момент опору небезпечного перетину обичайки

$$W \approx \frac{\pi D_{вн}^2}{4} (s - C) = \frac{3,14 \cdot 4,5^2}{4} (0,018 - 0,0026) = 0,258 \text{ м}^3$$

					Б/11.03.61033.000-40 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Еквівалентне напруження в обичайці від дії вигинаючого моменту

$$\sigma_e = 0,8 \frac{M}{W} = 0,8 \frac{4,7 \cdot 10^6}{0,258} = 1,44 \cdot 10^7 \text{ Па} = 14,4 \text{ МПа}$$

Величина еквівалентного напруження в обичайці від дії вигинаючого моменту повинна відповідати умові

$$\sigma_e \leq \sqrt{1,2[\sigma]^2 - \frac{(D_{\text{вн}} + (s - C))^2 p^2}{4 \cdot (s - C)^2 \varphi^2}}$$

$$\sqrt{1,2[\sigma]^2 - \frac{(D_{\text{вн}} + (s - C))^2 p^2}{4 \cdot (s - C)^2 \varphi^2}} = \sqrt{1,2 \cdot 88^2 - \frac{(4,5 + (0,018 - 0,0026))^2 0,2^2}{4 \cdot (0,018 - 0,0026)^2 0,677^2}} = 86 \text{ МПа}$$

$14,4 \text{ МПа} < 86 \text{ МПа}$ - умова виконується.

Обичайки, що мають зовнішні вигинаючі навантаження, при виконанні умови

$$\frac{l'}{D_{\text{вн}}} \geq 1$$

необхідно перевіряти на стійкість за наступною умовою:

$$(s - C) \geq \sqrt{\frac{1}{E} \left[k_1 \left(1 - \frac{k}{2} \right) + 0,125 \cdot k \cdot k_2 \right] \times \left(P + 4 \frac{M}{D_{\text{вн}}} \right)}$$

Розрахункова довжина обичайки

$$l' = L + 2h' = 9 + 2 \cdot 0,36 = 9,72 \text{ м}$$

- де $h' = 0,36 - 1/3$ висоти еліптичного днища

$$\frac{l'}{D_{\text{вн}}} = \frac{9,72}{4,5} = 2,16 > 1$$

Умова виконується.

					Б/11.03.61033.000-40 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Перевіримо обичайку на стійкість від дії зовнішнього навантаження (осьова сила відсутня).

Коефіцієнт k визначаємо за формулою:

$$k = \frac{2M}{0,25 p D_{\text{вн}} + M} = \frac{2 \cdot 4,636 \cdot 10^6}{0,25 \cdot 0,2 \cdot 4,5 + 4,636 \cdot 10^6} = 2$$

Коефіцієнти k_1 і k_2 визначаємо за відповідним графіком [6]

$$k_1 = 2,2$$

$$k_2 = 7,5$$

$$\sqrt{\frac{1}{E} \left[k_1 \left(1 - \frac{k}{2} \right) + 0,125 \cdot k \cdot k_2 \right] \times \left(P + 4 \frac{M}{D_{\text{вн}}} \right)} =$$

$$= \sqrt{\frac{1}{2 \cdot 10^{11}} \left[2,2 \left(1 - \frac{2}{2} \right) + 0,125 \cdot 2 \cdot 7,5 \right] \times \left(0 + 4 \frac{4,636 \cdot 10^6}{4,5} \right)} < (s - C)$$

$$6,196 \cdot 10^{-3} \text{ м} < 0,015 \text{ м}$$

Умова стійкості виконується.

Остаточно приймаємо товщину циліндричної обичайки $s = 18 \text{ мм}$. [11]

7.6 Розрахунок еліптичного днища

Метою даного розрахунку є визначення розрахункової товщини еліптичного днища горизонтального апарата, що працює під впливом внутрішнього надлишкового тиску, з урахуванням вимог міцності, герметичності та нормативних допусків.

Вихідні дані для розрахунку (рис.3.3.):

					Б/11.03.61033.000-40 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- матеріал днища – аустенітна сталь 08Х18Н10Т, ГОСТ 5632 – 92;
 - допустиме напруження при температурі $t = 35\text{ }^{\circ}\text{C}$, при якій відбувається процес метаностворення, $[\sigma_{\epsilon}] = \frac{\sigma_{\epsilon}}{n} = \frac{134}{1,5} = 88\text{ МПа}$, де $n = 1,5$ – коефіцієнт запасу;
 - модуль повздовжньої пружності для даного матеріалу за даних умов $E = 2 \cdot 10^5\text{ МПа}$;
 - середовище – органічні відходи, які включають в свій склад каналізаційні відходи міста а також органічні відходи з міських звалищ.
 - тиск в апараті $P = 0,2\text{ МПа}$.
 - внутрішній діаметр днища $D_{\text{вн}} = 4500\text{ мм}$, висота випуклої частини $h_{\epsilon} = 1000\text{ мм}$.
- днище має неукріплений отвір, ($d_l = 0,81\text{ м}$).

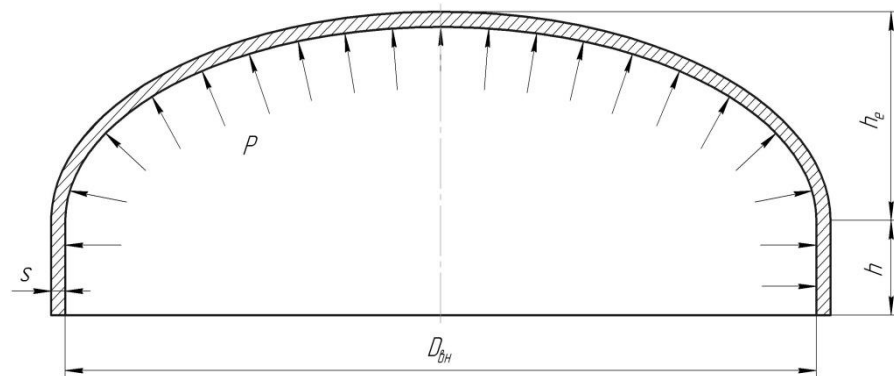


Рис.3.3. Схема навантаження еліптичного днища

Розрахункова товщина стінки днища s' , що піддається внутрішньому тиску $P = 0,2\text{ МПа}$, визначається за формулою:

$$s' = \frac{D_{\text{вн}} P}{3,8 \cdot [\sigma_{\epsilon}] k \cdot \varphi_{\text{ш}} - p} \cdot \frac{D_{\text{вн}}}{2 \cdot h_{\epsilon}} + C$$

					Б/11.03.61033.000-40 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

де - h_e - висота випуклої частини днища;

- k – безрозмірний коефіцієнт;

- $\varphi_{ш}$ - коефіцієнт міцності радіального зварного шва;

- $C = C_1 + C_2 + C_3$ - прибавка до розрахункової товщини, яка складається з $C_1 = 2$ мм – прибавка на корозію матеріалу; $C_2 = 0,6$ мм – прибавка на компенсацію мінусового відхилення товщини листа; $C_3 = 0$ – технологічна прибавка.

Коефіцієнт k визначаємо за формулою

$$k = 1 - \frac{d}{D_{en}} = 1 - \frac{0,081}{4,5} = 0,982$$

Так як

$$\frac{[\sigma_e]}{p} k \cdot \varphi_{ш} = \frac{88}{0,2} 0,982 \cdot 1 = 432 > 30$$

Величиною p в знаменнику формули для визначення розрахункової товщини стінки еліптичного днища зневажаємо.

Тоді

$$s' = \frac{D_{en} p}{3,8 \cdot [\sigma_e] k \cdot \varphi_{ш}} \cdot \frac{D_{en}}{2 \cdot h_e} + C = \frac{4,5 \cdot 0,2}{3,8 \cdot 88 \cdot 0,982 \cdot 1} \cdot \frac{4,5}{2 \cdot 1} + 0,0026 = 8 \cdot 10^{-3}$$

Приймаємо попередньо $s' = 5$ мм.

Визначимо напруження в стінці днища при гідравлічних випробуваннях апарату. Приймаємо тиск при гідравлічних випробуваннях

$$p_{випр} = 1,5 \cdot p = 1,5 \cdot 0,2 = 0,3 \text{ МПа}$$

Тоді напруження:

					Б/11.03.61033.000-40 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\sigma_{випр} = \frac{(D_{вн}^2 + 2h(s - C)) p_{випр}}{7,6 \cdot k \cdot \varphi_{ш} \cdot h(s - C)} = \frac{(4,5^2 + 2 \cdot 1 \cdot (0,008 - 0,0026)) 0,3}{7,6 \cdot 0,982 \cdot 1 \cdot 1 \cdot (0,008 - 0,0026)} = 132 \text{ МПа}$$

$$\sigma_{випр} > [\sigma_{\epsilon}]$$

В даному випадку умова міцності не виконується.

Приймаємо товщину стінки $s' = 16 \text{ мм}$.

Тоді напруження:

$$\sigma_{випр} = \frac{(D_{вн}^2 + 2h(s - C)) p_{випр}}{7,6 \cdot k \cdot \varphi_{ш} \cdot h(s - C)} = \frac{(4,5^2 + 2 \cdot 1 \cdot (0,016 - 0,0026)) 0,3}{7,6 \cdot 0,982 \cdot 1 \cdot 1 \cdot (0,016 - 0,0026)} = 58,2 \text{ МПа}$$

$$\sigma_{випр} = 58,2 \text{ МПа} < [\sigma_{\epsilon}] = 88 \text{ МПа}$$

Умова міцності виконується.

Остаточно приймаємо товщину еліптичного днища $s = 16 \text{ мм}$.

7.7 Розрахунок вала

Метою даного розрахунку є виконання перевірки жорсткого гладкого однопрольотного валу на вібростійкість з метою оцінки його динамічної надійності та виключення можливості виникнення резонансних коливань у процесі експлуатації.

Вихідні дані для розрахунку:

Довжина прольоту – $L = 11,5 \text{ м}$;

Кількість мішалок у прольоті – $n_d = 4$

Маси мішалок – $m_1, m_2, m_3, m_4 = 40 \text{ кг}$;

Координати центрів ваги мішалок: $l_1 = 2,41, l_2 = 4,66, l_3 = 6,91, l_4 = 9,16$;

Густина матеріалу – $\rho = 7850 \text{ кг/м}^3$;

					Б/11.03.61033.000-40 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Модуль пружності матеріалу – $E=2,1 \cdot 10^{11} \text{ Па}$;

Частота обертання валу - $n = 0,5$;

Коефіцієнт, що враховує умову вібростійкості - $\xi = 0,7$

Коефіцієнт, що враховує умову закріплення вала - $\eta = 48$

Коефіцієнт приведення маси деталі – $q=0,5$;

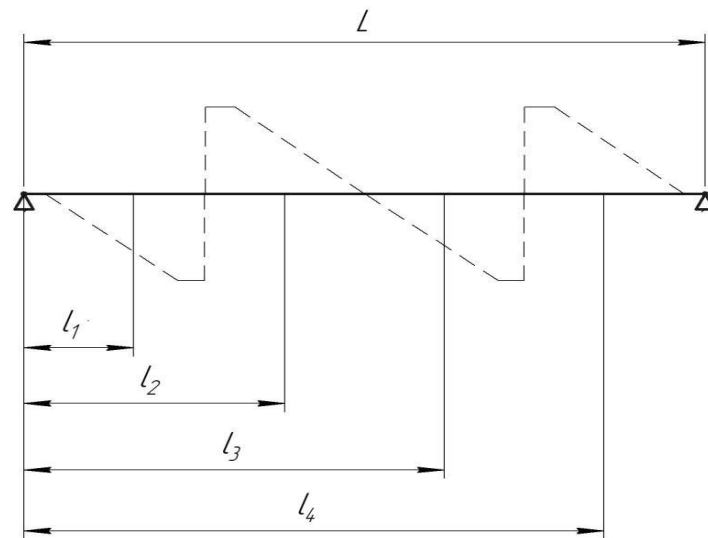


Рис. 3.4. До розрахунку валів на вібростійкість.

1. Відносні координати центрів ваги мішалок в прольоті:

$$\bar{l}_i = \frac{l_i}{L};$$

$$\bar{l}_1 = \frac{l_1}{L} = \frac{2,41}{11,5} = 0,208 \text{ м};$$

$$\bar{l}_2 = \frac{l_2}{L} = \frac{4,66}{11,5} = 0,403 \text{ м};$$

$$\bar{l}_3 = \frac{l_3}{L} = \frac{6,91}{11,5} = 0,597 \text{ м};$$

$$\bar{l}_4 = \frac{l_4}{L} = \frac{9,16}{11,5} = 0,792 \text{ м};$$

2. Безрозмірний динамічний прогин в центрі ваги мішалок:

$$\bar{y}_{ei} = \sin(\pi \cdot \bar{l}_i)$$

					Б/11.03.61033.000-40 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$y_{l1} = \sin(\pi \cdot \bar{l}_1) = \sin(\pi \cdot 0,208) = 0,608 \text{ м};$$

$$y_{l2} = \sin(\pi \cdot \bar{l}_2) = \sin(\pi \cdot 0,403) = 0,954 \text{ м};$$

$$y_{l3} = \sin(\pi \cdot \bar{l}_3) = \sin(\pi \cdot 0,597) = 0,954 \text{ м};$$

$$y_{l4} = \sin(\pi \cdot \bar{l}_4) = \sin(\pi \cdot 0,792) = 0,608 \text{ м};$$

3. Кутова швидкість вала:

$$\omega = \frac{\pi \cdot n}{30} = \frac{3,14 \cdot 0,5}{30} = 0,052 \text{ с}^{-1};$$

4. Безрозмірний коефіцієнт:

$$f = \frac{8\rho\omega L^2}{\xi\eta E} = \frac{8 \cdot 7850 \cdot 0,052 \cdot 11,5^2}{0,7 \cdot 48 \cdot 2,15 \cdot 10^{11}} = 4,55 \cdot 10^{11};$$

5. Приведена маса мішалок в прольоті:

$$m_{inp} = m_i \bar{y}_{li}^2;$$

$$m_{1np} = m_1 \bar{y}_{l1}^2 = 40 \cdot 0,608^2 = 14,789 \text{ кг};$$

$$m_{2np} = m_2 \bar{y}_{l2}^2 = 40 \cdot 0,954^2 = 36,376 \text{ кг};$$

$$m_{3np} = m_3 \bar{y}_{l3}^2 = 40 \cdot 0,954^2 = 36,376 \text{ кг};$$

$$m_{4np} = m_4 \bar{y}_{l4}^2 = 40 \cdot 0,608^2 = 14,789 \text{ кг};$$

6. Сума приведених мас мішалок:

$$m_{np} = \sum_{i=1}^{n\partial} m_{inp} = m_{1np} + m_{2np} + m_{3np} + m_{4np} = 14,789 + 36,376 + 36,376 + 14,789 = 102,329 \text{ кг};$$

7. Підкореневі одночлени

перший

$$A_1 = qfL_1^2 = 0,5 \cdot 4,55 \cdot 10^{-9} \cdot 11,5^2 = 3,04 \cdot 10^{-7};$$

другий

$$A_2 = \frac{8m_{np}fL_1}{\pi\rho} = \frac{8 \cdot 102,329 \cdot 4,55 \cdot 10^{-9} \cdot 11,5}{3,14 \cdot 7850} = 1,746 \cdot 10^{-9};$$

8. Розрахунковий діаметр

					Б/11.03.61033.000-40 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$d_p = \sqrt{A_1 + \sqrt{A_1^2 + A_2}} = \sqrt{3,04 \cdot 10^{-7} + \sqrt{(3,04 \cdot 10^{-7})^2 + 1,746 \cdot 10^{-4}}} = 5,529 \cdot 10^{-4} \text{ м};$$

Приймаємо трубчатий вал з параметрами:

$$d_{\text{зов}} = 0,08 \text{ м};$$

$$d_{\text{вн}} = 0,04 \text{ м};$$

$$\text{Отримаємо } d = d_{\text{зов}} - d_{\text{вн}} = 0,08 - 0,04 = 0,04 \text{ м};$$

9. Маса 1 м довжини вала, кг

$$m_L = \frac{\pi d^2 \rho}{4} = \frac{3,14 \cdot 0,04^2 \cdot 7850}{4} = 9,865 \text{ кг};$$

10. Відносна приведена маса деталей

$$\bar{m}_{np} = \frac{m_{np}}{m_L L} = \frac{102,329}{9,865 \cdot 11,5} = 0,897 \text{ кг};$$

11. Корінь частотного рівняння

$$\alpha = f(\bar{m}_{np}, \bar{L}) = 2,4;$$

12. Момент інерції перетину вала, м⁴

$$I = \frac{\pi(d_{\text{зов}} - d_{\text{вн}})^4}{64} = \frac{3,14 \cdot 0,04^4}{64} = 1,257 \cdot 10^{-7} \text{ м}^4;$$

13. Перша критична кутова швидкість, с⁻¹

$$\omega_{кр} = \left(\frac{\alpha}{L} \right) \sqrt{\frac{EI}{m_L}} = \left(\frac{2,4}{11,5} \right) \sqrt{\frac{2,15 \cdot 10^{11} \cdot 1,257 \cdot 10^{-7}}{9,865}} = 2,256 \text{ с}^{-1};$$

14. Умова вібростійкості

$$\frac{\omega}{\omega_{ед}} = \frac{0,052}{2,256} = 0,023 - \text{що менше } 0,7.$$

Умова вібростійкості виконується.

					Б/11.03.61033.000-40 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

7.8 Розрахунок опор апарату

Метою даного розрахунку є перевірка стійкості та міцності корпусу циліндричного апарата з еліптичними днищами, встановленого на трьох опорах, під дією власної ваги та ваги робочого середовища, на основі заданих вихідних даних. Розрахунок здійснюється з урахуванням впливу статичних навантажень і конструктивної схеми опираючості:

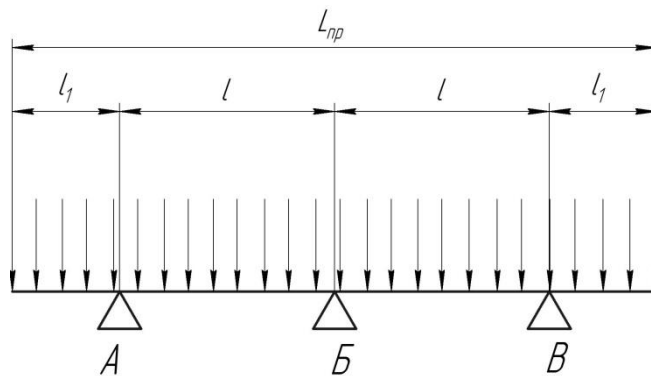


Рис. 3.5. Схема розподілення навантаження на опори апарату

- циліндрична обичайка

$$D_{зов} = 4,536 \text{ м};$$

$$D_{вн} = 4,5 \text{ м};$$

$$s_e - C = 0,015 \text{ м};$$

$$L = 9 \text{ м};$$

- еліптичне днище

$$- D_{Двн} = 4,504 \text{ м};$$

$$- h = 1,3 \text{ м};$$

$$- G_0 = 30\,000 \text{ Н};$$

$$- V_0 = 9,5 \text{ м}^3;$$

- матеріал обичайки і днища - аустенітна сталь марки 08Х18Н10Т;

					Б/11.03.61033.000-40 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- модуль пружності матеріалу $E = 2 \cdot 10^5 \text{ МПа}$;
- допустиме напруження $[\sigma_s] = 134 \text{ МПа}$;
- густина матеріалу $\rho_m = 7850 \text{ кг/м}^3$;
- густина середовища в апараті $\rho_c = 1020 \text{ кг/м}^3$;
- сила тяжіння заповненого середовищем апарату $G_a = 2 \cdot 10^6 \text{ Н}$;

Розрахунок проводимо для середньої опори, яка сприймає найбільше навантаження.

Реакція в опорі:

$$P_B = 0,354 \cdot G_a = 0,354 \cdot 2 \cdot 10^6 = 7,08 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

Приведена довжина еліптичного днища:

$$L_\delta = \frac{G_\delta + V_\delta \cdot g \cdot \rho_c}{0,785 \cdot g \cdot \left[\rho_m (D_{\text{зов}}^2 - D_{\text{вн}}^2) + \rho_c \cdot D_{\text{вн}}^2 \right]} =$$

$$= \frac{30 \cdot 10^3 + 9,5 \cdot 9,81 \cdot 1020}{0,785 \cdot 9,81 \cdot \left[7850 \cdot (4,536^2 - 4,5^2) + 1020 \cdot 4,504^2 \right]} = 0,7 \text{ м}$$

Приведена довжина апарату

$$L_{np} = L_k + 2 \cdot L_\delta = 9 + 2 \cdot 0,7 = 10,4 \text{ м}$$

Відстань між опорами $l = 3,3 \text{ м}$.

Розрахунковий вигинаючий момент від сили тяжіння:

$$M_{\text{виг}} = 0,0105 \cdot G \cdot L_{np} = 0,0105 \cdot 2 \cdot 10^6 \cdot 10,4 = 2,183 \cdot 10^5 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Напруження на вигин в корпусі апарату від сили тяжіння :

					Б/11.03.61033.000-40 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\sigma_{\text{виг}} = \frac{M_{\text{виг}}}{W} = \frac{M_{\text{виг}}}{0,8 \cdot D_{\text{вн}}^2 (s - C)} = \frac{2,183 \cdot 10^5}{0,8 \cdot 4,5^2 \cdot 0,0155} = 8,7 \cdot 10^5 \text{ Па} = 0,87 \text{ МПа}$$

Напруження незначні. Тому на стійкість корпус не перевіряємо.

Ширина опори апарату $b = 1,15 \text{ м}$.

Момент опору розрахункового перетину стінки корпусу над опорою:

$$W = \frac{[b + 8 \cdot (s - C)] \cdot (s - C)^2}{6} =$$

$$= \frac{[1,15 + 8 \cdot (0,018 - 0,0025)] \cdot (0,018 - 0,0025)^2}{6} = 5,1 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3$$

Напруження вигину в стінці апарату від дії реакції опори:

$$\sigma_{\text{виг}} = \frac{0,02 \cdot P_B \cdot D_{\text{зов}}}{W} = \frac{0,02 \cdot 7,08 \cdot 10^5 \cdot 4,536^2}{5,1 \cdot 10^{-5}} = 126 \cdot 10^6 \text{ Па}$$

$$[\sigma] = 134 \text{ МПа} > \sigma_{\text{виг}} = 126 \text{ МПа}$$

Умова міцності виконується. [12]

					Б/11.03.61033.000-40 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

8. Рекомендації з монтажу і експлуатації

Монтажні роботи складаються з комплексу дій, пов'язаних із встановленням апарата на металеву опорну конструкцію, підключенням допоміжного обладнання, а також з'єднанням усіх функціональних трубопроводів, призначених для подачі й відведення робочих середовищ. Окрему увагу приділяють встановленню засобів теплового та автоматичного регулювання. В процесі монтажу також усуваються виявлені конструктивні та виробничі дефекти, проводиться налаштування апарата та підготовка його до експлуатаційного режиму [13].

Основні етапи складання установки включають:

- встановлення корпусу апарата на металоконструкцію;
- монтаж внутрішніх конструктивних елементів;
- підключення усіх необхідних трубопровідних ліній;
- встановлення запірно-регулюючої арматури та контрольно-вимірювальних приладів;
- виконання герметизації з'єднувальних вузлів апарата;
- під'єднання допоміжних технічних засобів;
- монтаж захисних елементів і огорожень;
- проведення випробувань апарата на герметичність;
- за потреби — встановлення шару теплоізоляції;
- введення апарата в експлуатацію після завершення всіх монтажно-пусконаладжувальних робіт.

Підготовка апарата до введення в експлуатацію передбачає комплекс перевірочних заходів, зокрема контроль витрати теплоносія, його температурного режиму, тиску в апараті та приєднаних трубопроводах.

					Б/11.03.61033.000-40 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Важливо забезпечити надійний і зручний контроль за основними параметрами технологічного процесу з боку обслуговуючого персоналу.

Для досягнення стабільного й ефективного експлуатаційного режиму установки необхідно дотримуватись справності і безперебійної роботи всього технологічного обладнання [14].

					БІ11.03.61033.000-40 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

9. Охорона праці

У процесі експлуатації метантенка як основного апарата для анаеробного зброджування осадів стічних вод та активного мулу виникають низка шкідливих і небезпечних виробничих факторів, що потребують дотримання вимог чинного законодавства України в галузі охорони праці. Відповідно до Закону України «Про охорону праці», роботодавець зобов'язаний створити безпечні умови праці, мінімізувати професійні ризики та забезпечити систематичний інструктаж персоналу [17].

До основних небезпек, які супроводжують роботу біогазових установок із метантенками, належать: можливість викиду біогазу з високим вмістом метану й сірководню; підвищена температура обладнання; небезпека ураження електричним струмом; ризик вибуху внаслідок накопичення горючих газів; а також контакт персоналу з агресивними середовищами, що утворюються в процесі бродіння мулу.

Особливої уваги потребує повітря робочої зони, яке може містити домішки сірководню (H_2S) та аміаку. Вміст таких компонентів не повинен перевищувати гранично допустимих концентрацій, установлених ДСН 3.3.6.042-99. Системи газовідведення метантенка повинні бути обладнані зворотними клапанами, автоматичними вентиляційними пристроями та газоаналізаторами з сигналізацією при перевищенні допустимих рівнів [16].

Температура поверхонь апарата, що працює в умовах мезофільного або термофільного режиму, досягає 36–55 °С. В зоні обслуговування має бути передбачена теплоізоляція трубопроводів і теплообмінних сорочок, а також наявність попереджувальних написів і маркування відповідно до ГОСТ 12.4.026-76.

Усі електроустановки, що обслуговують роботу мішалки, датчиків і систем автоматики, повинні відповідати вимогам електробезпеки згідно з ГОСТ 12.1.019-79 і мати заземлення. Щитові пристрої повинні бути оснащені запобіжними блокуваннями, а в приміщеннях із вологим режимом

					Б/11.03.61033.000-40 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

експлуатації слід використовувати електрообладнання з підвищеним класом захисту.

Для забезпечення протипожежної безпеки передбачено ізольоване зберігання біогазу в газгольдерах, застосування вибухозахищеної арматури та дотримання вимог СНиП 2.09.02-85. Робочі приміщення повинні бути обладнаними системою примусової вентиляції з кратністю повітрообміну не менше 3 разів за годину та датчиками виявлення метану й сірководню.

Працівники, які експлуатують метантенк, мають проходити щорічний медичний огляд та первинний і періодичний інструктаж з охорони праці, а також забезпечуватись спецодягом, гумовим взуттям і засобами індивідуального захисту — респіраторами, захисними окулярами та рукавичками [18].

Важливо забезпечити наявність локальної витяжної вентиляції, пожежного щита, вогнегасників вуглекислотного типу, аптечки та евакуаційної схеми з позначенням безпечних маршрутів. Усі інструкції з техніки безпеки мають бути затверджені керівництвом підприємства, розміщені в зоні обслуговування установки в доступному для ознайомлення вигляді та оновлюватися не рідше одного разу на 3 роки.

Отже, забезпечення безпечних умов експлуатації метантенків вимагає дотримання комплексу заходів: інженерного захисту, моніторингу параметрів робочого середовища, дотримання технологічного регламенту та постійної підготовки персоналу. Лише за умови системного підходу до охорони праці можна досягти стабільної та безпечної роботи установки з мінімальними виробничими ризиками.

					Б/11.03.61033.000-40 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

9.1 Вибухо- і пожежонебезпека

Експлуатація метантенка в складі лінії очищення стічних вод та переробки активного мулу супроводжується ризиками, пов'язаними з вибухо- і пожежонебезпечністю. Внаслідок анаеробного зброджування в реакторі утворюється біогаз, який містить горючі компоненти — метан (CH_4) у концентрації до 70 %, а також домішки сірководню (H_2S), що утворює вибухонебезпечні газоповітряні суміші при концентрації понад 5 %.

За класифікацією ПУЕ, приміщення, де зберігається та відводиться біогаз, належить до вибухонебезпечних зон класу 2, що передбачає можливість періодичного утворення вибухонебезпечного середовища. За ДБН В.1.1-7-2016 виробництво відноситься до категорії “Б” за вибухопожежною небезпекою [18].

Для запобігання загрозі займання чи вибуху передбачена система аварійної вентиляції, що активується при перевищенні нижньої концентраційної межі вибуховості (НКМВ) метану понад 20 % у повітрі. Контроль здійснюється автоматично за допомогою газоаналізаторів з оптичним та звуковим сигналом.

Системи газовідведення обладнані зворотними клапанами, а в місцях потенційного накопичення біогазу встановлені вибухозахищені вентиляційні агрегати. Всі з'єднання трубопроводів герметизовані відповідно до ГОСТ 12.2.063-81, а електрообладнання має рівень вибухозахисту не нижче ПВТЗ згідно з ГОСТ 12.2.020-76.

Для гасіння загорянь, що можуть виникнути у разі витoku біогазу чи перегріву теплообмінного обладнання, передбачено застосування вуглекислотних вогнегасників типу ОУ-5, ОУ-8, а також порошкових вогнегасників типу ОП-10. У зоні обслуговування реактора встановлені пожежні гідранти з пожежними рукавами довжиною не менше 10 метрів та шириною проходів до евакуаційних виходів не менше 1,2 м. Мінімальна

					Б/11.03.61033.000-40 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

відстань до виходів — 30–40 м, кількість евакуаційних виходів — не менше двох.

Устаткування, яке може контактувати з біогазом, повинно бути виготовлене з матеріалів, які не утворюють іскор і мають хімічну стійкість до H_2S . Усі поверхні перед монтажем проходять очищення від залишків мастил та знежирення [17].

Стационарні системи пожежогасіння передбачені в зоні газгольдерів та приміщеннях з автоматикою подачі біогазу. Для гарантії безперервності роботи системи пожежогасіння у випадку знеструмлення передбачена подача води аварійними насосами з незалежним джерелом живлення.

Встановлено, що технологічний процес обробки мулу в метантенку, який супроводжується накопиченням та спалюванням біогазу, належить до таких, що мають підвищений рівень вибухопожежної небезпеки, а тому всі його елементи повинні відповідати вимогам чинного законодавства, зокрема: Кодексу цивільного захисту України, ДСН 3.3.6.042-99, ДБН В.1.1-7-2016, НАПБ А.01.001-2004 та ПУЕ (розд. 7.3).

					Б/11.03.61033.000-40 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Висновки

У бакалаврському проєкті було виконано комплексне дослідження, розробку та обґрунтування конструкції метантенка, призначеного для стабілізації активного мулу та утилізації органічної речовини зі стічних вод шляхом анаеробного зброджування. На основі аналітичного огляду сучасного стану питання, патентного пошуку та порівняння існуючих технічних рішень було встановлено, що ефективність роботи метантенків значною мірою залежить від наявності в них механізмів перемішування, систем теплообміну та конструктивної адаптації до біологічних особливостей процесу метаногенезу.

Запропонована в роботі конструкція метантенка з горизонтальним розміщенням, секційною теплообмінною системою та лопатевим мішальним пристроєм дозволяє створити стабільний температурний і гідродинамічний режим у робочому об'ємі апарата. Розрахунки підтвердили надійність, міцність і теплову ефективність конструкції при роботі в умовах мезофільного бродіння з температурою середовища близько 38 °С та тиском до 0,2 МПа. Також було визначено оптимальну площу теплообміну, товщини елементів корпусу, параметри теплоізоляції й особливості конструктивних вузлів.

Технічним результатом впровадження розробленої установки є зниження часу утримання субстрату в реакторі до 7 діб, стабільне біогазоутворення з виходом 545 м³/добу, рівномірне перемішування біомаси та підвищення ефективності деградації беззольної речовини до 43 %. Завдяки конструктивним рішенням вдалося мінімізувати утворення застійних зон і теплових втрат, що покращує якість кінцевого продукту — стабілізованого осаду, придатного до застосування як органічне добриво.

Економічна ефективність полягає в скороченні витрат на аерацію та утилізацію осаду, а також у частковому забезпеченні енергетичних потреб підприємства за рахунок отриманого біогазу. Запропоновану установку

					Б/11.03.61033.000-40 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

доцільно впроваджувати на очисних спорудах комунального типу, на підприємствах харчової, переробної промисловості та в агропромисловому секторі як автономну або складову частину комплексної біоенергетичної системи.

Соціальний ефект від впровадження проєкту полягає у зменшенні екологічного навантаження на довкілля, зниженні рівня забруднення водних ресурсів, покращенні санітарно-епідеміологічної ситуації у зонах з централізованим водовідведенням, а також у створенні умов для утилізації відходів з одночасним виробництвом вторинної енергії.

Отож, розроблена конструкція метантенка відповідає сучасним вимогам екологічної, енергетичної та технологічної ефективності, показує високу надійність і адаптованість до українських умов експлуатації, а також має практичну значущість і потенціал для широкого промислового впровадження.

					Б/11.03.61033.000-40 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Список використаної літератури

1. Біогаз / Голуб Г. А., Дубровін В. О., Поліщук В. М. та ін. — К. : ЮНІДО, 2015. — 46 с.
2. Петрук В. Г., Северин Л. І., Васильківський І. В., Безвозюк І. І. Природоохоронні технології. Частина друга: Методи очищення стічних вод : навч. посіб. — Вінниця : ВНТУ, 2014. — 258 с.
3. Токарчук Д. М., Яремчук О. В. Виробництво і використання біогазу в Україні: економічні і соціальні перспективи // Збірник наукових праць Таврійського державного агротехнологічного університету (економічні науки). — 2013. — № 2. — С. 338–346.
4. Мірошник М. М., Засядько Я. І. Перспективи використання біомаси для отримання теплової енергії в Україні // Земля України : матеріали міжнар. наук.-техн. конф. — Вінниця, 2011. — С. 78–82.
5. Фесюк В. О. Оцінка перспектив добування біогазу з осадків стічних вод Луцьких міських комунальних очисних споруд // Природа Західного Полісся. — 2010. — № 7. — С. 84–90.
6. Бугайов В. О., Проневич Н. О., Малиновський І. А. Обладнання анаеробного зброджування осадів стічних вод з утилізацією біогазу // Вісник ХНУ ім. В. Н. Каразіна. Серія: Екологія. — 2018. — № 18. — С. 57–63.
7. Шаманський С. Й. Енергоефективні рішення в біореакторних системах очищення стічних вод : дис. ... канд. техн. наук. — Київ : НУХТ, 2019. — 165 с.
8. Поліщук В., Тарасенко С., Сергєєва О. Конструктивні особливості метантенків // MOTROL. — 2011. — Т. 13В. — С. 56–61.
9. Аналіз способів та засобів для перемішування субстрату в метантенках біогазових установок // Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research. — 2019. — Вип. 4. — С. 15–25.

					<i>Б/11.03.61033.000-40 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

10. Краснолуцький П. П. Основні завдання при проектуванні гідромеханічної системи перемішування субстрату у метантенку // Аграрна наука та освіта в умовах євроінтеграції : зб. наук. пр. міжнар. наук.-практ. конф. (20–21 березня 2019 р., м. Кам'янець-Подільський). — Тернопіль : Крок, 2019. — Ч. 2. — С. 75–78.
11. Михайліченко В. П., Нечипоренко Д. І., Новожилова Т. Б., Себко В. В., Пітак І. В., Пітак О. Я. Розрахунок і конструювання посудин і апаратів хімічної та харчової промисловості. Частина 1 : навч. посіб. — Харків : НТУ «ХП», 2020. — 280 с.
12. Андреев І. А. Конструювання і розрахунок типового устаткування хімічних виробництв. Основні положення. Елементи тонкостінних посудин, навантажених внутрішнім тиском : навч. посіб. — Київ : Політехніка, 2011. — 272 с.
13. Мікульонок І. О. Монтаж, експлуатація та ремонт обладнання хімічних і нафтопереробних виробництв : навч. посіб. — Київ : НТУУ "КПІ", 1998. — 255 с.
14. Самойчук К. О., Бойко В. С., Олексієнко В. О. та ін. Основи розрахунку та конструювання обладнання переробних і харчових виробництв : підручник. — Мелітополь : Видавничий дім «ММД», 2020. — 428 с.
15. Правила улаштування електроустановок. Розділ 7.3 «Електроустановки у вибухонебезпечних зонах» / Міненерго України. — Чинна редакція.
16. ДСН 3.3.6.042-99. Державні санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень / МОЗ України. — Київ : МОЗ, 1999. — 45 с.
17. НАПБ А.01.001-2004. Правила пожежної безпеки в Україні / МНС України. — Київ : Держстандарт, 2004. — 114 с.
18. Метантенк : пат. № 113249 Україна / Голуб Г. А., Швець Р. Л., Завадська О. А., Чуба В. В. та ін. ; заявл. 13.11.2015 ; опубл. 26.12.2016, Бюл. № 24. — 5 с.

					Б/11.03.61033.000-40 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

19. Гідрогравітаційний метантенк : пат. № 111008 Україна / Голуб Г. А.,
Рубан Б. О., Чуба В. В. та ін. ; заявл. 17.07.2014 ; опубл. 10.03.2016, Бюл. №
5. — 5 с.

					Б/11.03.61033.000-40 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Додаток А

Додаток А. Патентна документація відірана для подальшого аналізу.

ОГД, його складові частини	Документи на об'єкти промислової власності	
	Бібліографічні дані	Відомості щодо їхньої дії
Anaerobic fermentation to produce biogas	US9416372B2 США 2016-08-16	Діє
An anaerobic wastewater treatment system	EP2558421B1 ЄС 2013-02-13	Діє
Anaerobic reactor	CN102381759B Китай 2015-06-17	Діє
Two-stage biogas production system for anaerobic digesters	US11634349B2 США 2023-04-25	Діє
Anaerobic process for production of methane rich biogas	EP4273253A1 ЄС 2024-12-05	Діє
Анаеробний біореактор для очищення стічної води	UA 93476 U Україна 10.10.2014	Діє
Модульна біогазова установка з обертовим реактором	UA 81154 Україна 10.06.2013	Не діє
Гідрогравітаційний метантенк	UA 111008 C2 Україна 10.03.2016	Діє

Проведений патентний пошук дозволив виявити низку технічних рішень, що стосуються конструкції та функціонування метантенків для анаеробного зброджування осадів стічних вод. Аналіз виявлених патентів показав, що основні напрямки розвитку цієї техніки включають: Оптимізацію конструкції метантенків для покращення гідродинаміки та забезпечення рівномірного перемішування субстрату. Використання багатоступеневих систем зброджування для підвищення ефективності процесу та зменшення часу утримання осаду. Інтеграцію систем очищення біогазу для отримання метану високої чистоти та зменшення вмісту сірководню. Застосування нових матеріалів та технологій для зменшення енергоспоживання та підвищення довговічності обладнання.

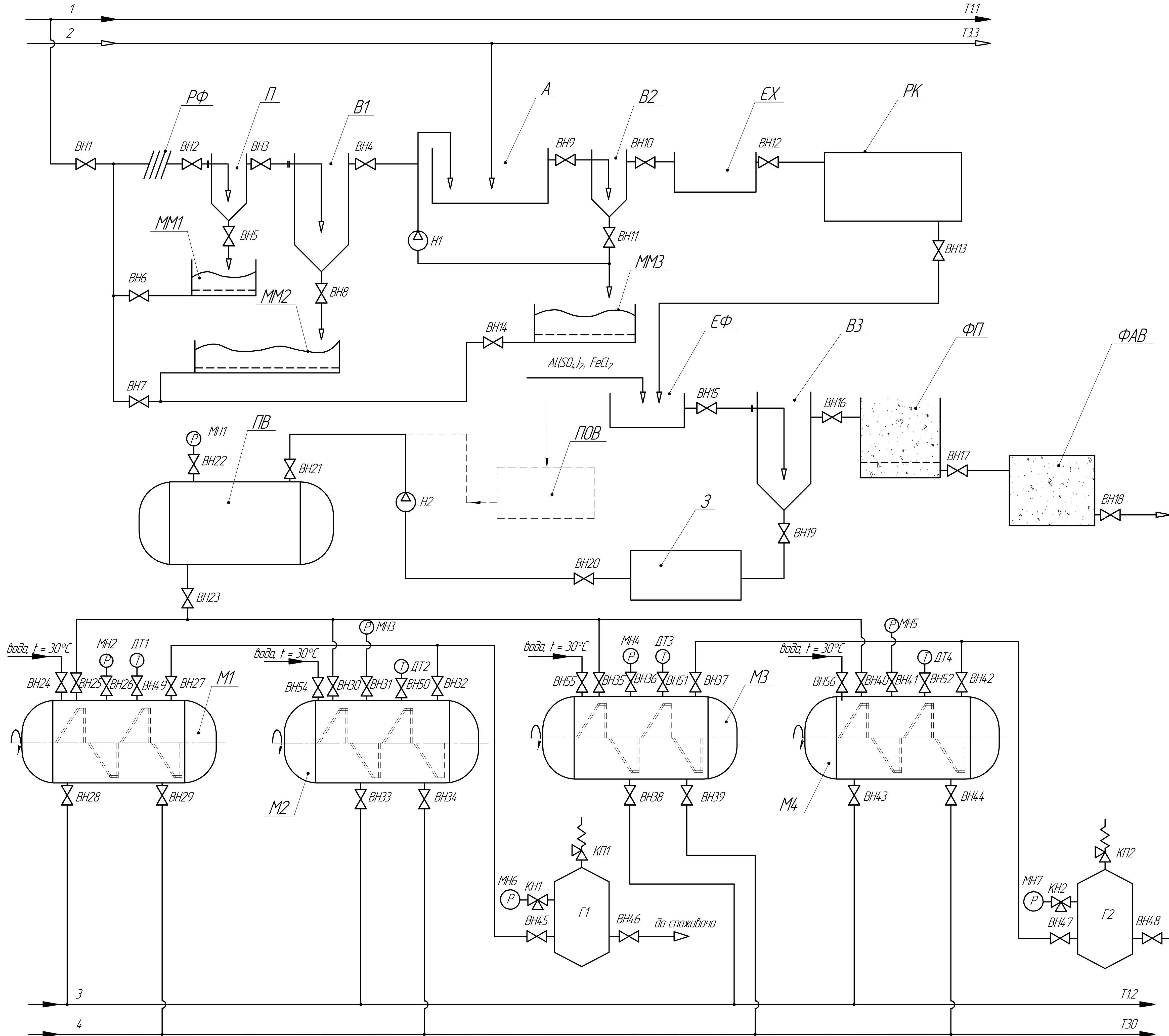
					Б/11.03.61033.000-40 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Додаток Б.
Специфікації

[illegible]

[illegible]

Перв. застосує.		Формат	Зона	Поз.	Позначення	Найменування	Кіл.	Примітка	
Додат. №						Документація			
		A3		B/1103.61024.007.000-40	Теплообмінник	3			
						Деталі			
			1	B/1103.61024.007.001-40	Труба	8			
			2	B/1103.61024.007.002-40	Коліно	7			
			3	B/1103.61024.007.003-40	Рама	1			
			4	B/1103.61024.007.004-40	Хомут	16			
						Стандартні вироби			
			5		Фланець ГОСТ 12821-80	16			
			6		Болти ГОСТ15591-70 М14	64			
Підп. і дата			7		Гайка ГОСТ 15526-70 М14	64			
			8		Шайба ГОСТ11371-78 М15	64			
Взам. інв. №		Б/1103.61024.007-40							
Підп. і дата		Теплообмінник. Специфікація				Літ.	Аркцш	Аркцшів	
							1	1	
Інв. № ориг.						НТУУ "КПІ"			
						БІ-11, ФБТ			
		Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата			
		Розроб.		Гераскін Н.Р.					
		Перев.		Косова В.П.					
		Н. контр.							
		Затв.							

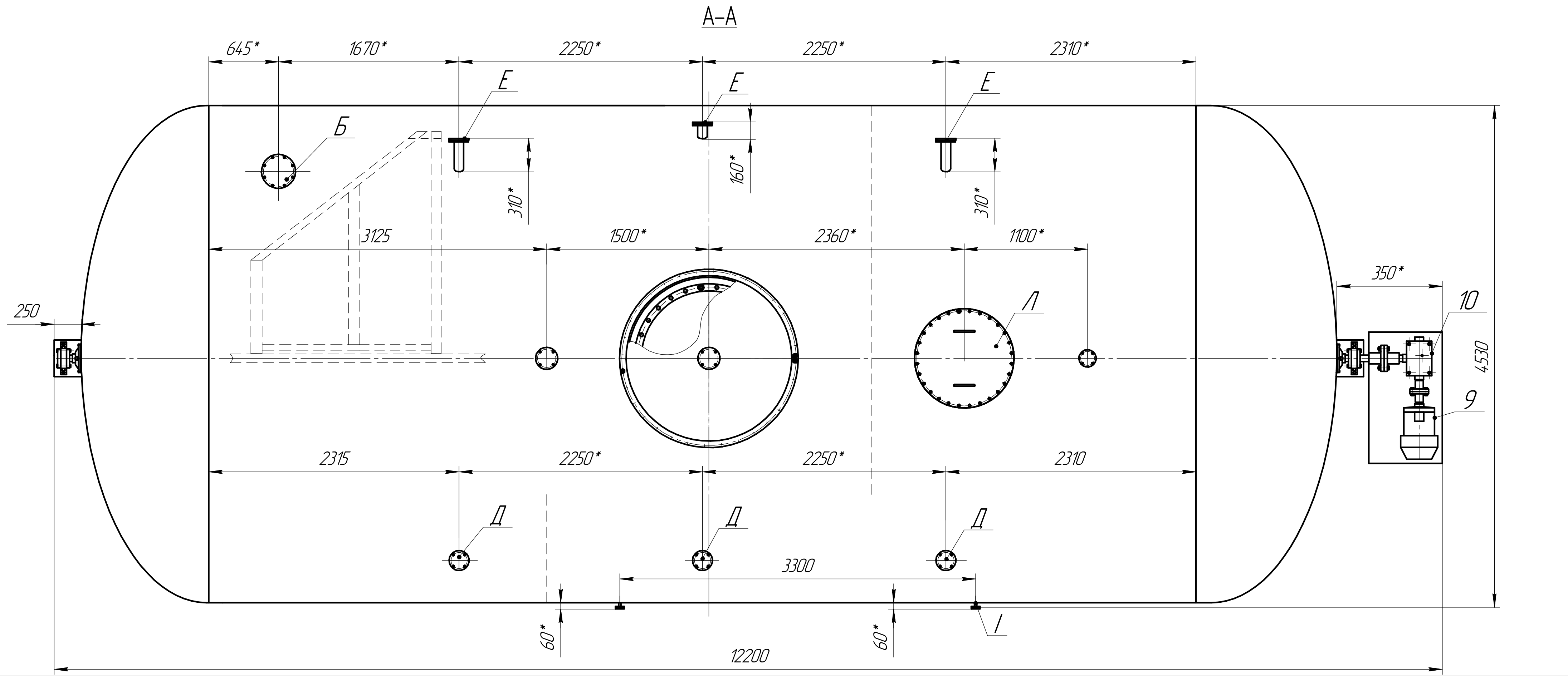
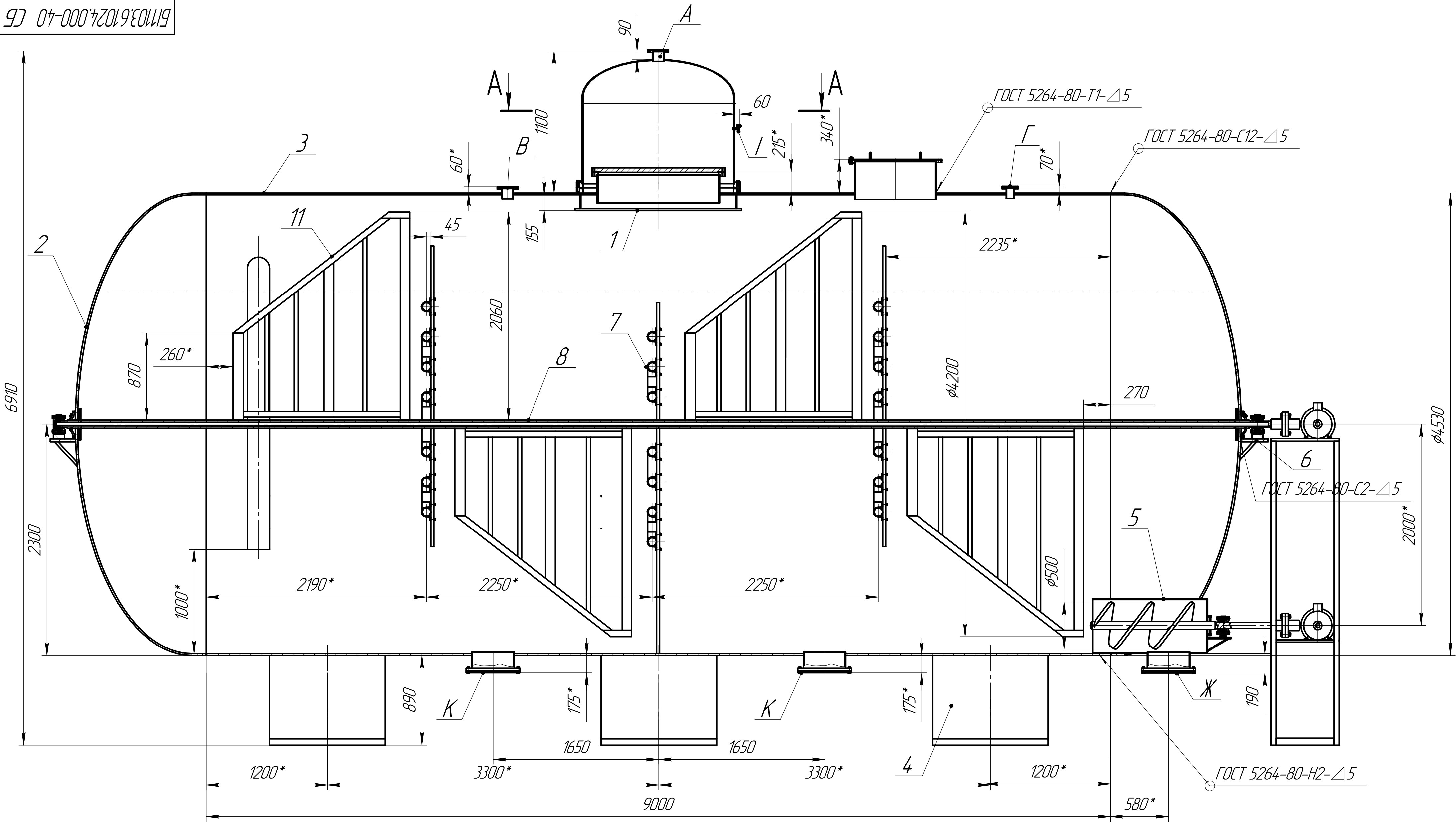


Позначення	Найменування	Кільк.	Прим.
ВН1..ВН56	Вентиль напорний	56	
КН1, КН2	Кран натяжний	2	
КТ1, КТ2	Клапан запобіжний пружинний повнонапісний	2	
М1..М4	Метантенк	4	P=0,2МПа
ММ1..ММ3	Майданчик муловий	3	
РФ	Решітка фільтруюча	1	
П	Пісколовлювач	1	
В1..В3	Відстійник	3	
А	Аеротенк	1	
ЕХ	Ємність для хлорування	1	
РК	Резервуар контактний	1	
ЕФ	Ємність для флокуляції	1	
ФП	Фільтр піщаний	1	
ФАВ	Фільтр з активованим вугіллям	1	
З	Згушувач осаду	1	
ПОВ	Покривлювач органічних відходів	1	
ПВ	Підігрівач-витримувач	1	
МН1..МН7	Манометр	7	
ДТ1..ДТ4	Датчик температури	4	
Г1, Г2	Газгольдер	2	

Таблиця трубопроводів

T11	Вода на очищення
T33	Повітря для аерації
T12	Вода відпрацьована
T30	Відходи на переработку

					Б1103.61024.000-40 АС			
					Установка очищення побутових стічних вод	Лит.	Маса	Масштаб
Зм.	Авк.	№ док.	Підп.	Дата		0		1:25
Разроб.		Геращенко І.Р.						
Перев.		Косова В.П.						
Т.контр.					Архив		Архив 1	
Н.контр.					ТНУУ "КП"			
Затверд.					ФБТ, Б1-11			
					Формат А1			



Таблиця штучерів

Познач.	Призначення	Кільк.	Умовн. провід, D _у , мм	Умовн. тиск, P _у , МПа	Вильот штучера, мм
A	Для відбору газу	1	100	0,6	90
Б	Для підведення субстрату	1	200	0,6	400
В	Для датчика заміру рівня рідини в апараті	1	100	0,6	60
Г	Для клапана запобіжного	1	65	0,6	70
Д	Для підводу води для охолодження	3	80	0,6	60
Е	Для відводу води для охолодження	3	80	0,6	60
Ж	Для відведення відпрацьованого субстрату	1	400	0,6	190
З	Для датчика заміру температури	1	15	0,25	60
І	Для датчика заміру тиску	2	15	0,25	60
Л	Люк	1	800	0,3	340
К	Запобіжний	2	400	0,6	175

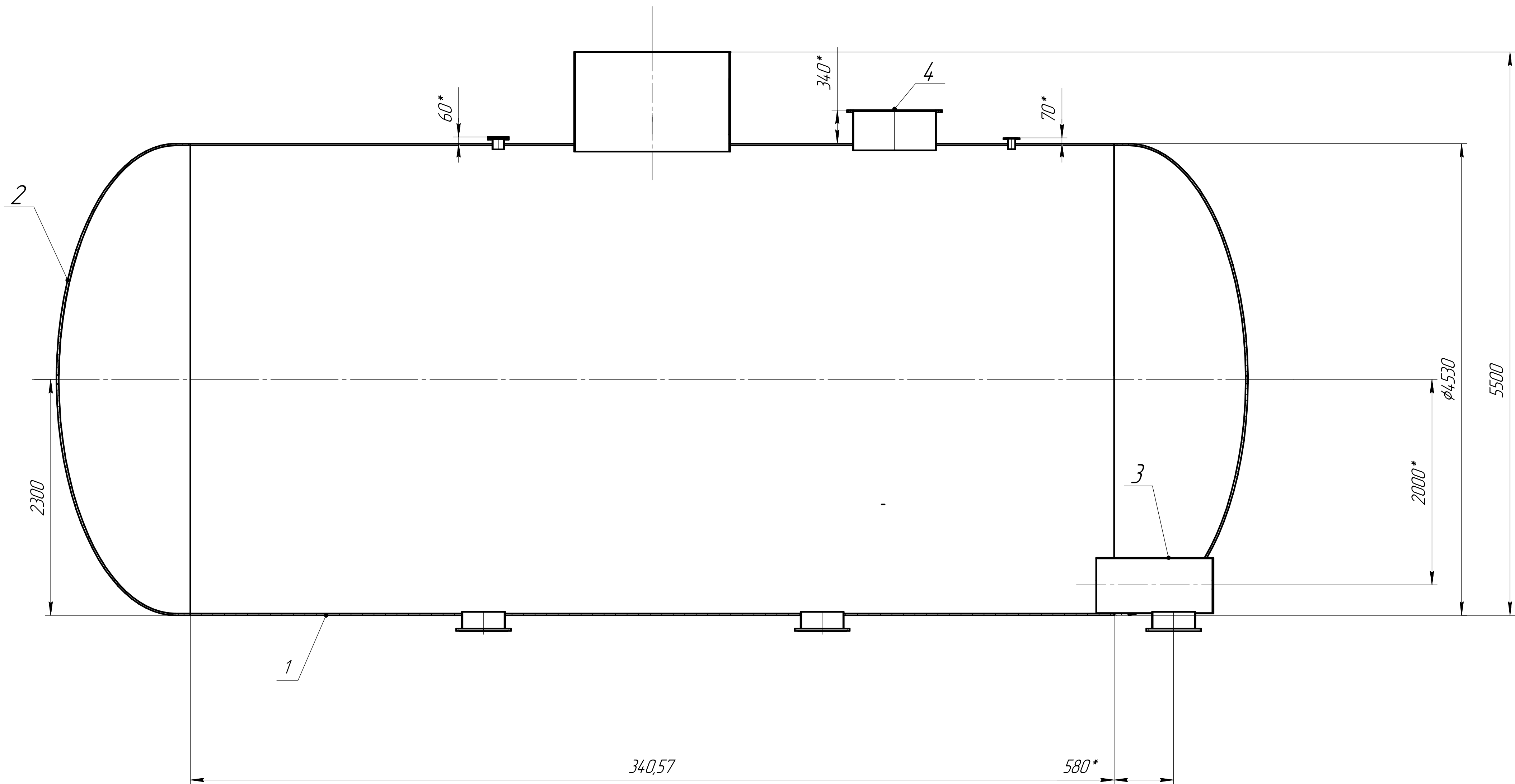
Технічна характеристика

- Призначення – для синтезу біогазу з відходів комунального г. господарства
- Об'єм – номінальний, м³ – робочий, м³
- Тиск, МПа – у апараті робочий – у апараті при гідралічних випробуваннях
- Температура середовища, °С – робочого середовища – охолоджуючої води
- Витрати охолоджуючої води, м³/год
- Площа поверхні теплообміну, м²
- Привід ЗВ180МВ/Ч-100
- Частота обертання, с⁻¹
- Рівень шуму, дБ (по шкалі А шумометра)
- Середовище у апараті – нетоксичне, корозійне, вибухонебезпечне
- Маса виробу в робочому стані, кг
- Габаритні розміри, м

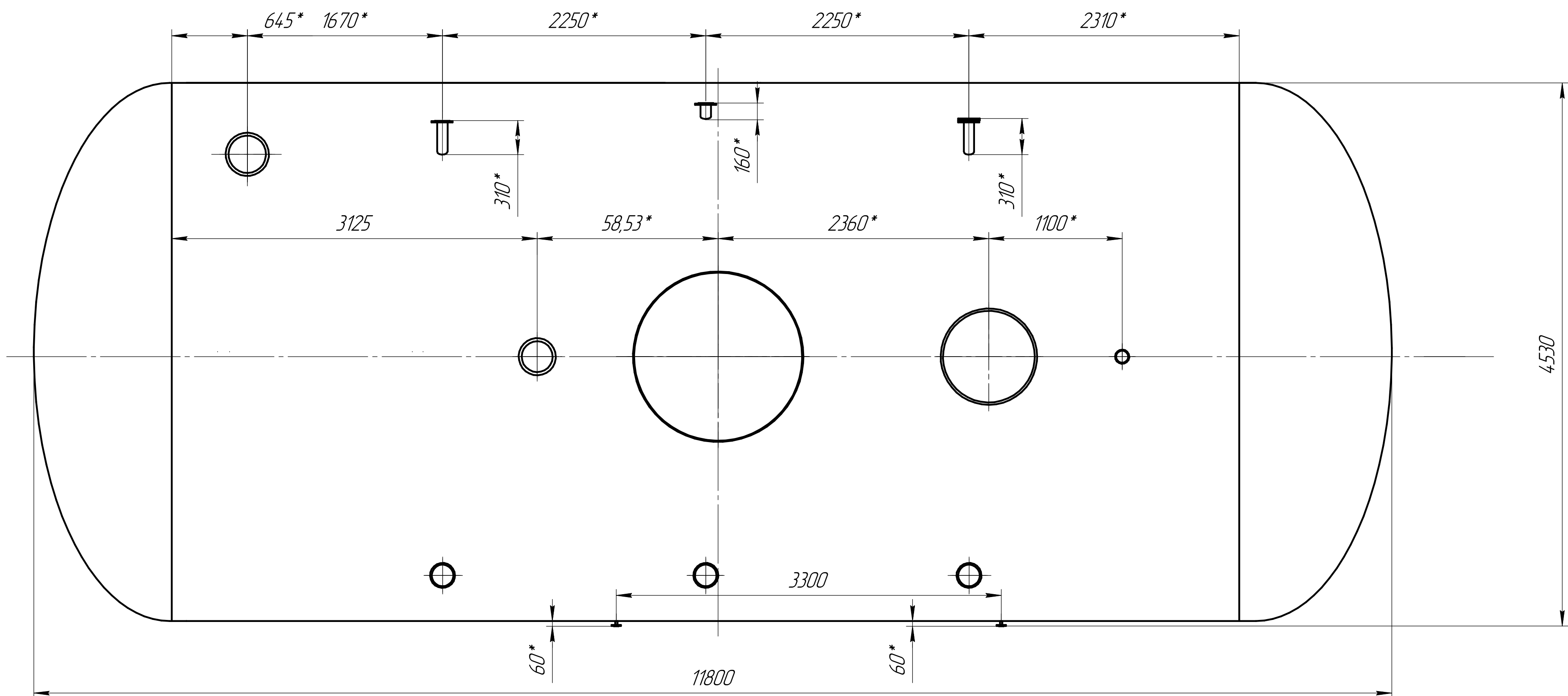
Технічні вимоги

- Виготовлення та випробування апарату проводити згідно ОСТ 26 – 291, ОСТ 26 – 01 – 1244
- Матеріали основних деталей – сталь 08Х22Н6Т ГОСТ 5632-91
- Корпус апарату випробувати гідралічним тиском 0,3 МПа
- Провести одкатку приводу при робочому тиску в апараті на протязі 4х годин при заповненні апарату водою, при цьому не дозволяється нагрів підшипника більше 70°С
- Покриття одроблюваних поверхнь з вуглецевої сталі проводити по варіанту захисту ГОСТ 9014-92
- Покриття зовнішніх поверхнь апарату проводити в один шар грун товстою ГФ 0119 червано-коричневою ГОСТ 23343-88
- Маркувати згідно СТП 0117-90
- При експлуатації необхідно встановити прокладки по ГОСТ 17133-91, згідно технічної документації
- Ізоляція умовно не зображена
- Розміри для довідок крім *

БІ1103.61024.000-40 СК			
Метантенк			
Складальне креслення			
Зм.	Док.	№ док.	Підп.
Розроб.	Гораскін НР		
Перев.	Косова ВП		
Т.контр.			
Н.контр.			
Затверд.			
Лист		Маса	Масштаб
0			1:25
Архив		Архив	
НТУУ "КПІ"		БІ-11, ФБТ	
Формат А1			



A-A



Технічні вимоги

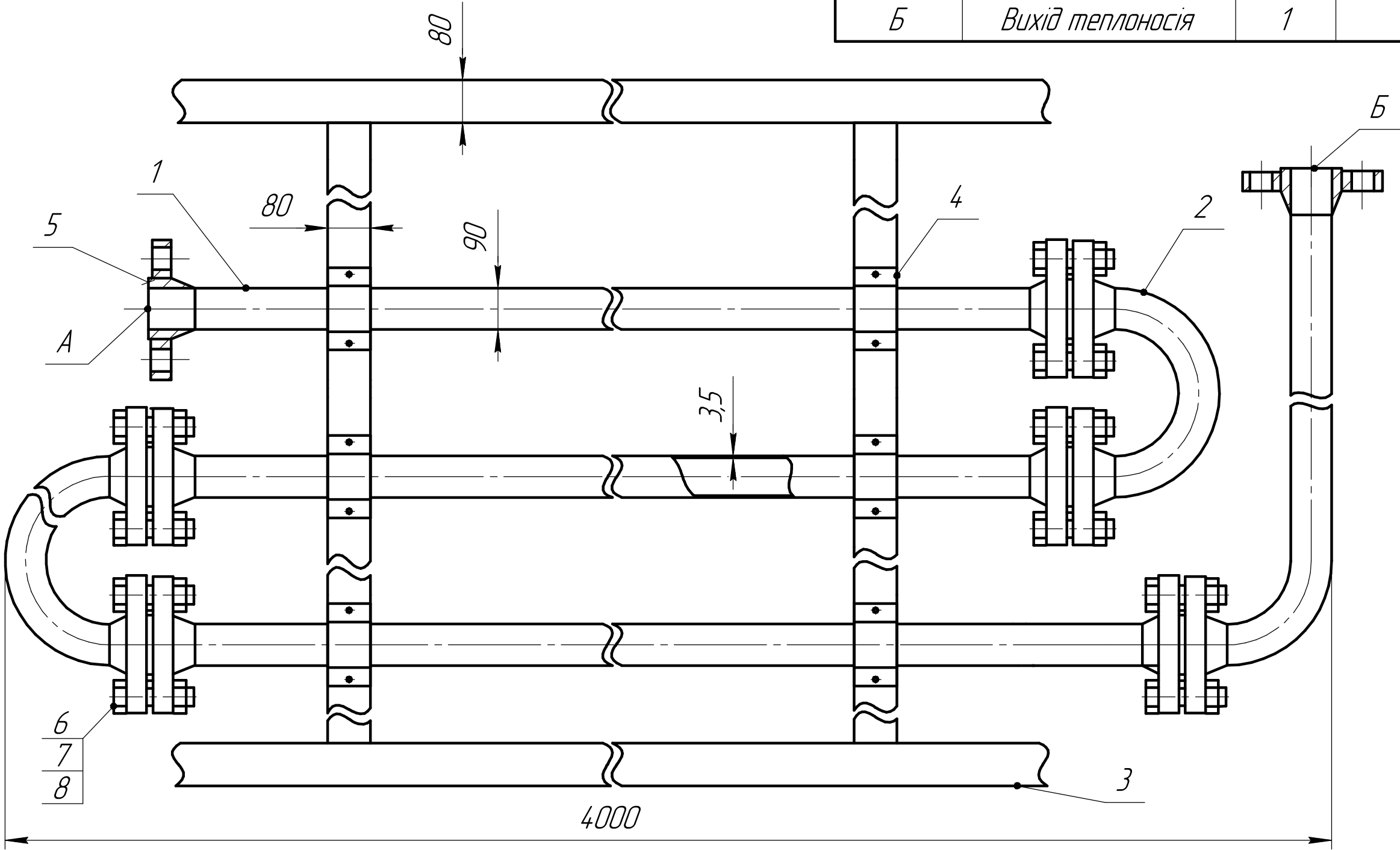
- Виготовлення та випробування апарату проводити згідно ОСТ 26 - 291, ОСТ 26 - 01 - 1244.
- Матеріали основних деталей - сталь 08Х22Н6Т ГОСТ 5632-91
- Корпус апарату випробувати гідравлічним тиском 0,3 МПа
- Провести обкатку приводу при робочому тиску в апараті на протязі 4х годин при заповненні апарату водою, при цьому не дозволяється нагрів підшипника більше 70°C
- Покриття оброблюваних поверхонь з вуглецевої сталі проводити по варіанту захисту ГОСТ 9014-92
- Покриття зовнішніх поверхонь апарату проводити в один шар грунту ГФ 0119 червоно-коричневою ГОСТ 23343-88
- Маркувати згідно СТП 0117-90
- При експлуатації необхідно встановити прокладки по ГОСТ 17133-91, згідно технічної документації
- Ізоляція умовно не зображена
- Розміри для довідок крім *

				БІ1103.61024.003-40 СК								
				Корпус								
Эк.	Арк.	№ докум.	Лист						Дата	Лист	Маса	Масштаб
Разроб.		Гіраскин Н.Р.								0		1:25
Перед.		Косово В.Г.								Аркци		Аркци
Г.контр.						НТУУ "КПІ"						
						БІ-11, ФБТ						
Н.контр.												
Затверд.												

БІ1115.82615.003-40 СК

Таблиця штуцерів

Позначення	Найменування	Кіл.	Ду, мм	Р _у , МПа
А	Вхід теплоносія	1	90	0.9
Б	Вихід теплоносія	1	90	0.9



					БІ1115.82615.007-40 СК				
					Теплообмінник	Літ.		Маса	Масштаб
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата					1:1
Розроб.	Гераскін Н.Р.								
Перев.	Косова В.П.								
Т.контр.									
						Аркш		Аркшів	1
Н.контр.						НТУУ "КПІ"			
Затв.						БІ-11, ФБТ			