

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ «КИЇВСЬКИЙ
ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Факультет біотехнології і біотехніки
Кафедра біотехніки та інженерії

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

_____ Мельник В. М.
(підпис) (ініціали, прізвище)

“ _____ ” _____ 2025 р.

Дипломний проект

на здобуття ступеня бакалавра

зі спеціальності _____ 133 Галузеве машинобудування
(код і назва)

на тему: Лінія виробництва лимонної кислоти з розробкою теплообмінника кожухотрубного

Виконав (-ла): студент (-ка) 4 курсу, групи БІ-11
(шифр групи)

_____ Мороз Олександра Андріївна _____
(прізвище, ім'я, по-батькові) (підпис)

Керівник: _____ Остапенко Жанна Ігорівна _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) (підпис)

Консультант: _____
(назва розділу) (посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали) (підпис)

Рецензент: _____ Сметюх Михайло Петрович _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) (підпис)

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

Студент _____
(підпис)

Київ-2025

**Пояснювальна записка
до дипломного проєкту**

на тему: «Лінія виробництва лимонної кислоти з розробкою теплообмінника кожухотрубного»

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Факультет біотехнології та біотехніки

Кафедра біотехніки та інженерії

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 133 Галузеве машинобудування

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Мельник В. М.
(підпис) (ініціали, прізвище)

“ _____ ” _____ 2025 р.

Завдання

на дипломний проєкт студенту

Мороз Олександрі Андріївні
(прізвище, ім'я, по-батькові)

1. Тема проєкту: «Лінія виробництва лимонної кислоти з розробкою теплообмінника кожухотрубного»,

керівник проєкту Остапенко Жанна Ігорівна, ст. викл. кафедри
(прізвище, ім'я, по-батькові, науковий ступінь вчене звання)

затверджені наказом по університету від « _____ » _____ 20__ р. № _____

2. Термін подання студентом проєкту: _____

3. Вихідні данні до проєкту:

- Масова витрата розчину 103 т/год;
- Концентрація розчину 17%;
- Початкова температура розчину 19 °С;
- Кінцева температура розчину 55°С;
- Тиск насиченої водяної пари, становить 0.2 МПа.

4. Зміст пояснювальної записки, перелік завдань, що їх належить виконати:

Завданням на дипломний проект є комплексне дослідження та розробка лінії виробництва лимонної кислоти з детальним проектуванням ключового елемента – кожухотрубного теплообмінника. Робота повинна включати: детальний опис технологічного процесу виробництва лимонної кислоти; визначення призначення, області використання та технічних характеристик проектованого теплообмінника; обґрунтування вибору його конструкції з аналізом переваг та недоліків; проведення патентних досліджень для вивчення рівня техніки, виявлення аналогів та підтвердження патентної чистоти розробки; виконання необхідних теплових та конструктивних розрахунків, що підтверджують працездатність і надійність конструкції; розробку рекомендацій з монтажу та експлуатації; формулювання висновків за результатами роботи; складання списку використаних джерел та оформлення додатків.

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо):

Апаратурна схема лінії виробництва лимонної кислоти (A1); складальний кресленик кожухотрубного теплообмінника (A1); складальне креслення корпусу (A2); складальне креслення кришки (A2); пояснювальна записка (A4).

6. Консультанти розділів проекту:

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання

«03» лютого 2025р.

Календарний графік-план

№ п/п	Назва етапів виконання дипломного проекту	Термін виконання етапів проекту	Примітка
1	Функціональне призначення установки та сфери її використання. Опис та властивості кінцевого продукту, що отримується. Детальний опис послідовності операцій технологічного процесу.	03.02.2025-17.03.2025	
2	Виконання апаратурної схеми лінії виробництва лимонної кислоти.	17.03.2025-25.03.2025	
3	Проведення патентного пошуку.	25.03.2025-30.03.2025	
4	Розрахунки для підтвердження працездатності. Комп'ютерне моделювання.	30.03.2025-10.05.2025	
5	Настанови з монтування та подальшого користування.	10.05.2025-14.05.2025	
6	Складальний кресленник апарату.	14.05.2025-28.05.2025	
7	Кінцеве оформлення пояснювальної записки.	28.05.2025-10.06.2025	

Студент:

(підпис)

Мороз О. А.

(прізвище, ініціали)

Керівник проекту:

(підпис)

Остапенко Ж. І.

(прізвище, ініціали)

Анотація

Дипломна бакалаврська робота за спеціальності 133 «Галузеве машинобудування», присвячена темі: «Лінія виробництва лимонної кислоти з розробкою кожухотрубного теплообмінника».

Загальний обсяг представленої дипломної роботи становить 79 сторінок текстового матеріалу (пояснювальної записки) та графічну частину, що виконана на 2 аркушах формату А1 та на 2 аркушах А2. Для ілюстрації матеріалу в пояснювальній записці використано 24 рисунків та 1 таблицю. Бібліографічний список налічує 14 посилань.

Мета полягає у проектуванні лінії виробництва лимонної кислоти, що ґрунтується на вивченні її технологічних особливостей, та включає детальну розробку і розрахунок кожухотрубного теплообмінника як основного елемента теплового обладнання.

У процесі виконання дипломної роботи було вивчено специфіку теплообміну при виробництві лимонної кислоти та здійснено проектування кожухотрубного теплообмінника. Розрахункова частина роботи доводить, що розроблений апарат є працездатним і надійним, та розглядає перспективи його оптимізації.

Ключові слова: лимонна кислота, теплообмінник.

Abstract

Bachelor's thesis in specialty 133 "Industrial Engineering", dedicated to the topic: " The establishment of a citric acid manufacturing process, including the creation of a shell-and-tube heat exchanger ".

Total volume of the presented thesis is 79 pages of text material (explanatory note) and a graphical part, made on 2 A1 format sheets and on 2 A2 format sheets. To illustrate the material, the explanatory note uses 24 figures and 1 table. The bibliography list includes 14 references.

The aim is to design a citric acid production line, based on the study of its technological features, and details the development and calculation processes for a shell-and-tube heat exchanger, treating it as the core thermal component.

During the execution of the thesis, the specifics of heat exchange in citric acid production were studied, and the design of machine Shell and Tube Heat Exchanger was carried out. The calculation part of the work proves that the developed apparatus is operable and reliable, and considers the prospects for its optimization.

Keywords: A citric acid, heat exchanger.

Зміст

Перелік умовних позначень та скорочень	10
Вступ.....	11
1 Призначення та сфери використання теплообмінника	13
1.1 Опис лимонної кислоти	14
1.2 Біосинтез лимонної кислоти.....	16
1.3 Технологічна схема виготовлення лимонної кислоти	18
2 Обґрунтування та опис обраної конструкції	22
2.1 Принцип дії й конструкція апарату	22
2.2 Порівняння ключових критеріїв обраної конструкції з аналогами.....	27
2.3 Відомості про патентний пошук	29
3 Технічна характеристика.....	41
4 Розрахунки, що підтверджують працездатність та надійність теплообмінника	42
4.1 Тепловий розрахунок апарату	42
4.1.1 Знаходження теплового навантаження теплообмінника	42
4.1.2 Визначення коефіцієнта теплопередачі	43
4.1.3 Розрахунок площі поверхні теплообміну	45
4.2 Визначення і розрахунок конфігурації габаритів елементів, кріпильних деталей, модулів у зборі з подальшою перевіркою їхньої міцності.....	48
4.2.1 Розрахунок елементів конструкції	48
4.2.2 Обчислення параметрів і міцності еліптичного днища (еліптичної кришки)	50

					БІ-110750231-20 ПЗ			
Змін.	Лист.	Ном. Докум.	Підп.	Дата	Лінія виробництва лимонної кислоти з розробкою теплообмінника кожухотрубного	Літера	Лист	Листів
Розробив	Мороз О.А.						8	79
Перевірив	Остапенко Ж. І.							
Норм. Контр.						КПІ ім. Ігоря Сікорського ФБТ, БІ-11		
Затвердив	Мельник В. М.							

4.2.3	Розрахунковий аналіз приєднувальних патрубків (штуцерів)	52
4.2.4	Розрахунок фланцевих з'єднань	53
4.2.5	Аналіз конструкції теплообмінника в SolidWorks.....	54
4.2.6	Результати розрахунку моделювання апарату	56
4.2.7	Моделювання Flow Simulation.....	60
4.3	Гідравлічний розрахунок.....	63
4.4	Розрахунок на довговічність.....	64
4.5	Оцінка на ремонтпридатність	64
5	Рекомендації щодо експлуатації та монтажу	68
6	Рівень уніфікації та стандартизації	70
6.1	Важливість стандартизації й уніфікації	70
6.2	Застосування стандартних виробів	71
6.3	Розрахунок на уніфікацію та стандартизацію	72
	Висновки	73
	Conclusions	75
	Література, використана у роботі.....	77
	Додатки.....	79

Перелік умовних позначень та скорочень

pH – водневий показник;

ГОСТ – Державний стандарт (міждержавний);

ДСТУ – Державний стандарт України;

КВП – Контрольно-вимірювальні прилади;

ККД – Коефіцієнт корисної дії;

КТ – Кожухотрубний теплообмінник;

ЛК – лимонна кислота;

МПК – Міжнародна патентна класифікація;

НД – Нормативний документ;

ТО – Теплообмінник;

УДК – Універсальна десяткова класифікація;

ЦТК – цикл трикарбонівих кислот.

					БІ-110750231-20 ПЗ	Лист
Змін.	Лист.	Ном. Док.	Підп.	Дата		10

Вступ

Лимонна кислота є однією з ключових органічних сполук, які містять карбоксильну групу, що широко застосовується у різноманітних галузях сучасної індустрії. Її унікальні властивості як регулятора кислотності, консерванту, антиоксиданту та хелатуючого агента роблять її незамінним компонентом у харчовій, фармацевтичній, косметичній та хімічній промисловості. Постійне зростання світового попиту на лимонну кислоту стимулює пошук шляхів інтенсифікації її виробництва та підвищення його економічної й енергетичної ефективності.

Сучасні методи виробництва лимонної кислоти, зокрема мікробіологічний синтез за допомогою пліснявих грибів, являють собою складні технологічні процеси, які вимагають суворого дотримання певних параметрів, серед яких температурний режим відіграє критичну роль. Забезпечення оптимальних температур на стадіях підготовки сировини, ферментації, а також під час виділення та очищення цільового продукту безпосередньо впливає на вихід кислоти, її якість та загальну рентабельність виробничої лінії [1].

У цьому контексті, ефективне управління тепловими потоками стає одним із найважливіших завдань. Ключовим обладнанням для вирішення цієї задачі є теплообмінні апарати. Кожухотрубні теплообмінники, завдяки своїй конструктивній надійності, високій ефективності теплопередачі та можливості роботи в широкому діапазоні температур і тисків, є одними з найпоширеніших у хімічній та біотехнологічній промисловості.

Незважаючи на широке застосування, аналіз існуючих рішень та науково-технічної літератури показує, що існує потреба в удосконаленні конструкцій теплообмінників та оптимізації їх роботи саме для умов виробництва лимонної кислоти. Розробка нових або модернізація існуючих апаратів, що враховують специфіку робочих середовищ та теплових

навантажень, може суттєво знизити енергетичні витрати, підвищити стабільність процесу та продуктивність лінії.

Актуальність та практична значущість розробки ефективного теплообмінного обладнання для виробництва лимонної кислоти зумовили вибір теми даної дипломної роботи.

Метою роботи є проектування лінії виробництва лимонної кислоти з детальною розробкою та розрахунком кожухотрубного теплообмінника, призначеного для забезпечення необхідних температурних режимів на одній із ключових стадій технологічного процесу.

Реалізація поставленої мети вимагає послідовного вирішення низки ключових **завдань**:

- Провести аналіз сучасних технологій виробництва лимонної кислоти та ролі теплообмінних процесів у них.
- Обґрунтувати вибір технологічної схеми та визначити місце і параметри роботи теплообмінника.
- Описати існуючі конструкції кожухотрубних теплообмінників та обрати оптимальний варіант.
- Виконати тепловий та конструктивний розрахунки проектного теплообмінника.
- Здійснити гідравлічний розрахунок та перевірочний розрахунок на міцність основних елементів апарату.
- Обрати відповідні конструкційні матеріали.
- Розробити креслення загального вигляду кожухотрубного теплообмінника.

Результати даної роботи можуть бути використані при модернізації існуючих або проектуванні нових виробництв лимонної кислоти, сприяючи підвищенню їх ефективності та конкурентоспроможності.

					БІ-110750231-20 ПЗ	Лист
Змін.	Лист.	Ном. Док.	Підп.	Дата		12

1 Призначення та сфери використання теплообмінника

Теплообмінні апарати відіграють фундаментальну роль у сучасних промислових технологіях, виконуючи ключову функцію – ефективну передачу теплової енергії між різними робочими середовищами без їх прямого контакту. Це дозволяє не лише суттєво підвищити енергоефективність виробництв шляхом утилізації вторинних енергоресурсів, але й забезпечує точне дотримання температурних режимів, що є критично важливим у хімічній, біотехнологічній та багатьох інших галузях. Процес виробництва лимонної кислоти, зокрема його ключова стадія – мікробна ферментація, є яскравим прикладом такої необхідності [1].

Оскільки ферментація є екзотермічним процесом, стабільне відведення надлишкового тепла для підтримання оптимальної температури ЛК є вирішальним фактором для життєдіяльності мікроорганізмів-продуцентів та, як наслідок, для досягнення високого виходу та якості цільового продукту. Саме для виконання цього завдання – надійного контролю температури в ферментері – і призначений кожухотрубний теплообмінник, що розробляється в рамках даного проекту.

Кожухотрубні теплообмінники здобули широке розповсюдження завдяки своїй конструктивній міцності, високій надійності, здатності працювати в широкому діапазоні тисків і температур, а також відносній простоті експлуатації та ремонту. Завдяки цим перевагам сфери їх використання є надзвичайно різноманітними. Вони є невід'ємною частиною технологічних ліній у нафтопереробній та хімічній промисловості, як нагрівачі, охолоджувачі, конденсатори, випарники, в енергетиці, конденсатори турбін, підігрівачі води, у харчовій та фармацевтичній галузях, пастеризатори, стерилізатори, охолоджувачі, а також у металургії, целюлозно-паперовій промисловості та системах кондиціонування.

Таким чином, розробка та розрахунок кожухотрубного теплообмінника для специфічних умов лінії виробництва лимонної кислоти не лише вирішує

					БІ-110750231-20 ПЗ	Лист
Змін.	Лист.	Ном. Док.	Підп.	Дата		13

важливу локальну інженерну задачу, але й базується на принципах та підходах, що мають широке застосування та велике значення для підвищення ефективності та стабільності багатьох промислових процесів.

1.1 Опис лимонної кислоти

Лимонна кислота, відома також як 2-гідроксипропан-1,2,3-трикарбонова кислота, є однією з найпоширеніших та найважливіших органічних кислот у природі та промисловості. Вперше виділена у кристалічному вигляді шведським хіміком Карлом Вільгельмом Шеєле у 1784 році з лимонного соку, вона відіграє центральну роль у метаболізмі практично всіх аеробних організмів через цикл трикарбонових кислот (цикл Кребса). Сьогодні її значення виходить далеко за межі біохімії, адже завдяки своїм унікальним фізико-хімічним властивостям, вона є незамінним компонентом у харчовій, фармацевтичній, косметичній та багатьох інших галузях промисловості, де широко відома як харчова добавка E330.

Лимонна кислота знаходить найширше застосування у харчовій промисловості, що поглинає близько 70% її світового виробництва. Тут вона виконує багато функцій: виступає як регулятор кислотності та підсилювач смаку в напоях, кондитерських виробах і консервах; діє як консервант, створюючи несприятливе для мікроорганізмів середовище; працює як антиоксидант та стабілізатор, запобігаючи псуванню жирів та зберігаючи колір продуктів. Фармацевтична галузь, близько 12%, використовує лимонну кислоту та її солі, цитрати як компоненти шипучих лікарських форм, як антикоагулянти для консервації крові, а також як буферні агенти та коректори смаку в сиропах і розчинах [1].

Решта обсягу, а саме близько 18%, припадає на хімічну промисловість, виробництво мийних засобів та косметику. У мийних засобах вона цінується як екологічно безпечний хелатуючий агент, що пом'якшує воду та видаляє накип, замінюючи фосфати. У хімічній промисловості її використовують як реагент та буферний компонент. У косметиці лимонна кислота слугує для

					БІ-110750231-20 ПЗ	Лист
Змін.	Лист.	Ном. Док.	Підп.	Дата		14

регулювання рН, як антиоксидант, а також як активний інгредієнт, альфа-гідрокси кислота, у засобах для догляду за шкірою. Така багатогранність застосування зумовлена її унікальними хімічними властивостями та безпечністю.

З хімічної точки зору, лимонна кислота є триосновною оксикарбоною кислотою. Її хімічна формула - $C_6H_8O_7$, а молярна маса становить 192.12 г/моль. Молекулярна структура лимонної кислоти зображена на рисунку 1.1:

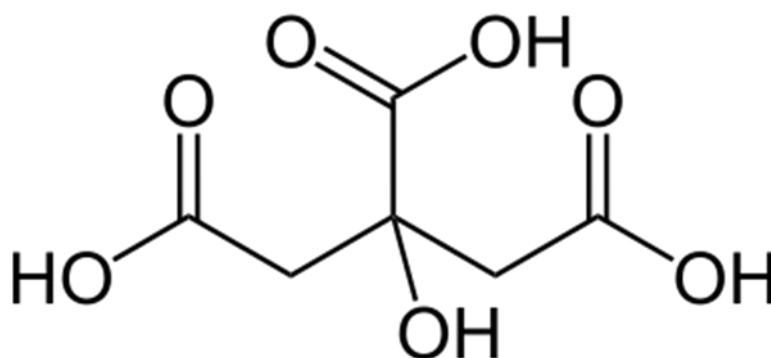


Рис.1.1 – Молекулярна структура лимонної кислоти.

[<http://ua.ahabiochem-sp.com/food-ingredients/acidity-regulator/citric-acid-monohydrate-cas-5949-29-1.html>]

За фізичними властивостями, лимонна кислота являє собою білу кристалічну речовину без запаху, але з характерним сильним кислим смаком. Вона існує у двох основних формах: безводній (ангідрид) та у вигляді моногідрату ($C_6H_8O_7 \cdot H_2O$), який кристалізується з холодних водних розчинів. Лимонна кислота добре розчинна у воді (близько 133 г/100 мл при 20 °С) та етанолі, але погано розчинна в діетиловому ефірі та інших малополярних розчинниках. Температура плавлення безводної форми близько 153 °С, а при подальшому нагріванні вона розкладається [1].

Хімічні властивості лимонної кислоти є основою її широкого застосування. Як триосновна кислота, вона дисоціює у водних розчинах у три стадії, що робить її та її солі (особливо цитрат натрію) ефективними буферними системами для підтримки стабільного рН. Однією з найважливіших властивостей є її здатність утворювати стійкі комплексні

сполуки (хелати) з іонами металів (кальцію, магнію, заліза, міді тощо). Ця хелатуюча здатність використовується для пом'якшення води, запобігання окисленню жирів та вітамінів (діючи як синергіст антиоксидантів), стабілізації продуктів та як засіб для чищення [2].

Емпірична формула лимонної кислоти, що показує співвідношення атомів у молекулі, – $C_6H_8O_7$. Її систематична назва – 2-гідроксипропан-1,2,3-трикарбонова кислота – дає чітке уявлення про її структуру (рис 1.2).

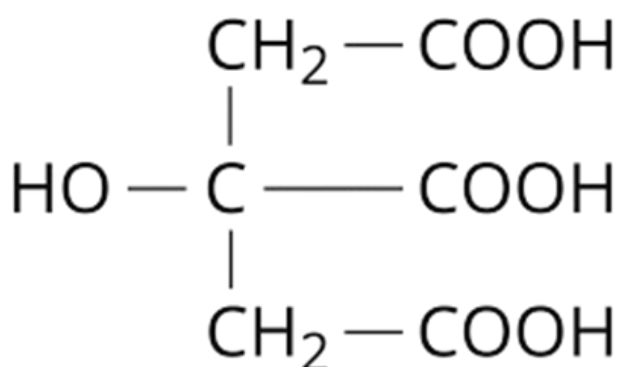


Рис. 1.2 - Хімічна формула лимонної кислоти
($\text{COOH-CH}_2\text{-C(OH)(COOH)-CH}_2\text{-COOH}$).

[<https://tardigrade.in/question/the-total-number-of-diprotic-acid-s-among-the-following-is-citric-j38dlmyz>]

Молекула побудована на основі тривуглецевого скелета (пропану). Ключовою особливістю є те, що до кожного з трьох атомів вуглецю приєднана карбоксильна група ($-\text{COOH}$). Крім того, центральний, другий атом вуглецю несе також гідроксильну ($-\text{OH}$) групу. Саме ця комбінація – три карбоксильні групи та одна гідроксильна – визначає її унікальні властивості як триосновної оксикарбонової кислоти.

1.2 Біосинтез лимонної кислоти

Промислове виробництво лимонної кислоти сьогодні практично повністю базується на біосинтезі – процесі мікробної ферментації. Цей метод виявився значно ефективнішим та економічно доцільнішим порівняно з екстракцією з рослинної сировини чи хімічним синтезом. Основою технології є використання спеціально відселекціонованих штамів мікроорганізмів,

					БІ-110750231-20 ПЗ	Лист
Змін.	Лист.	Ном. Док.	Підп.	Дата		16

здатних ефективно перетворювати доступні вуглеводні субстрати на цільовий продукт. Беззаперечним лідером серед продуцентів є міцеліальний гриб *Aspergillus niger*, відкриття продукуючої здатності якого на початку ХХ століття стало революційним. Цей мікроорганізм обирають завдяки його високій продуктивності, здатності використовувати різноманітні й дешеві джерела вуглецю (як-от меляса чи глюкозні сиропи), стійкості до низьких значень рН (що захищає від контамінації) та добре вивченій фізіології та генетиці, що дозволяє постійно вдосконалювати штами [2].

Біохімічно, синтез лимонної кислоти в клітинах *A. niger* є частиною центрального метаболічного шляху. Вуглеводи через гліколіз перетворюються на піруват, який далі декарбоксилюється до ацетил-КоА. Саме ацетил-КоА вступає в цикл трикарбонових кислот (ЦТК), реагуючи з оксалоацетатом з утворенням лимонної кислоти під дією ферменту цитратсинтази. Однак, для промислового виробництва недостатньо простого функціонування ЦТК; необхідно створити умови для надсинтезу та виведення кислоти з клітини. Це досягається шляхом ретельного контролю умов культивування: висока концентрація цукру забезпечує потік субстрату, тоді як лімітація азотом та фосфором гальмує ріст і пригнічує активність ферментів, що споживають цитрат. Важливу роль відіграє також лімітація іонами марганцю (Mn^{2+}), які є кофакторами деяких ферментів ЦТК. Підтримання низького рН, близько 2.0, та забезпечення достатньої аерації, оскільки процес є аеробним, також є критичними факторами для максимального накопичення продукту.

Історично першим та досі існуючим методом є поверхнева ферментація, де гриб росте на поверхні рідкого або твердого субстрату в спеціальних камерах чи лотках. Цей метод менш чутливий до деяких параметрів, але характеризується нижчою продуктивністю та складністю масштабування. Сучасним стандартом є глибинна (занурена) ферментація, що проводиться у великих стерильних біореакторах (ферментерах). У цьому випадку міцелій гриба росте дисперговано (у вигляді гранул чи ниток) у рідкому поживному

					БІ-110750231-20 ПЗ	Лист
Змін.	Лист.	Ном. Док.	Підп.	Дата		17

середовищі при інтенсивному перемішуванні та аерації. Глибинний метод дозволяє досягти значно вищої продуктивності, кращого контролю над процесом та автоматизації, хоча й вимагає більших енергетичних витрат.

Після завершення ферментації – а це зазвичай 7-14 днів, культуральну рідину, що містить лимонну кислоту, відокремлюють від біомаси (міцелію) шляхом фільтрації або центрифугування. Подальший етап – виділення та очищення – є складним і багатостадійним. Найчастіше використовують метод осадження: до розчину додають вапняне молоко ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), що призводить до утворення малорозчинного цитрату кальцію. Осад відфільтровують, промивають і обробляють сірчаною кислотою. В результаті утворюється розчин лимонної кислоти та нерозчинний осад гіпсу (CaSO_4), який видаляють. Отриманий розчин далі очищують за допомогою іонообмінних смол та активованого вугілля, концентрують шляхом випаровування (де знову ж таки важливі теплообмінники) і кристалізують, отримуючи кінцевий продукт у вигляді білих кристалів. Успішність усього процесу залежить від синергії біологічних знань та інженерних рішень, що забезпечують оптимальні умови на кожному етапі.

1.3 Технологічна схема виготовлення лимонної кислоти

Промислове виробництво лимонної кислоти є багатогранним технологічним процесом, який умовно можна розділити на три фундаментальні етапи: підготовка сировинної бази та поживного середовища, власне мікробний синтез (ферментація) та, нарешті, виділення й очищення кінцевого продукту з культуральної рідини. Кожен з цих етапів включає низку послідовних операцій, що реалізуються за допомогою специфічного обладнання. Апаратурна схема (рис. 1.3) слугує для візуалізації цих операцій, показуючи взаємозв'язок між апаратами та напрямки матеріальних потоків, що є основою для розуміння, контролю та оптимізації всього виробничого циклу [3].

звичайно, теплообмінних апаратів, що забезпечують необхідні температурні режими.

Технологічний процес виробництва лимонної кислоти методом глибинної ферментації, представлений на апаратурній схемі, починається з етапу підготовки поживного середовища. Основним субстратом є меляса, яка з резервуару для зберігання (поз. 1) транспортується до приймального бака (поз. 2). Для забезпечення точного дозування меляса зважується на вагах (поз. 3), після чого подається у котел (поз. 4). У котлі відбувається її розведення водою та попередня обробка, що може включати освітлення, додавання поживних солей та регулювання рН. Готове поживне середовище за допомогою насоса (поз. 5) перекачується у проміжну ємність (поз. 6), звідки воно буде направлено на стерилізацію [3].

Наступним критично важливим етапом є стерилізація поживного середовища, метою якої є повне знищення сторонньої мікрофлори. Цей процес відбувається у безперервному потоці. Середовище з ємності (поз. 6) направляється у стерилізаційну колону (поз. 7), де досягає високої температури завдяки гострій парі. Для гарантованого знищення всіх мікроорганізмів та їх спор, середовище витримується при цій температурі у теплообміннику кожухотрубному (поз. 8). Після цього гаряче стерильне середовище охолоджується до температури, оптимальної для ферментації, у холодильнику (поз. 9).

Охолоджене стерильне середовище надходить у серце виробничої лінії – виробничі ферментери (поз. 11,13). Це великі апарати, де відбувається безпосередньо біосинтез лимонної кислоти. Паралельно готується посівний матеріал *Aspergillus niger* в інокуляторі (поз. 10), який потім вноситься у ферментери. Для підтримання життєдіяльності аеробного гриба та активного синтезу кислоти у ферментери через індивідуальні фільтри (поз. 12) безперервно подається стерильне повітря. Протягом всього процесу, що триває кілька діб, контролюється температура (за допомогою теплообмінника,

					БІ-110750231-20 ПЗ	Лист
Змін.	Лист.	Ном. Док.	Підп.	Дата		20

що є об'єктом розробки даної роботи) та здійснюється дозування додаткових речовин, таких як піногасники та дезінфікуючі розчини.

Після завершення циклу ферментації, отримана культуральна рідина, що являє собою суміш розчиненої лимонної кислоти та біомаси гриба (міцелію), направляється на стадію розділення. Спочатку вона збирається в ємності для меляси (поз. 14), а потім подається на барабанний вакуум-фільтр (поз. 15). Тут відбувається відділення міцелію, який збирається у приймачі (поз. 16), від рідкого фільтрату, далі направляється у вакуум збірник (поз. 17). Фільтрований розчин лимонної кислоти, що є цільовим напівпродуктом, накопичується у вакуум-збірнику (поз. 18). Цей розчин далі передається на наступні стадії – хімічне очищення, концентрування та кристалізацію, що дозволяють отримати кінцевий товарний продукт високої чистоти.

					БІ-110750231-20 ПЗ	Лист
Змін.	Лист.	Ном. Док.	Підп.	Дата		21

2 Обґрунтування та опис обраної конструкції

Вибір та проектування теплообмінного обладнання є ключовим етапом у створенні ефективної та надійної технологічної лінії виробництва лимонної кислоти. Враховуючи необхідність точного контролю температури на стадії ферментації, де відбувається значне виділення тепла, а також потенційну потребу в нагріві чи охолодженні на інших етапах, наприклад, стерилізація, було прийнято рішення про розробку кожухотрубного теплообмінника. Цей тип апаратів обрано завдяки його численним перевагам: високій надійності в експлуатації, здатності працювати в широкому діапазоні температур та тисків, можливості створення значної поверхні теплообміну в компактному об'ємі, відносній простоті виготовлення та обслуговування, а також великому досвіду його застосування у хімічній та біотехнологічній промисловості [2].

2.1 Принцип дії й конструкція апарату

З огляду на габаритні обмеження та вимоги до потоків, було обрано вертикальну конструкцію кожухотрубного теплообмінника з нерухомими трубними решітками. Вертикальне виконання дозволяє ефективно використовувати виробничу площу, що є важливим фактором для промислових підприємств.

Конструкція з нерухомими, жорстко закріпленими трубними решітками є однією з найпростіших та найдешевших у виготовленні. Вона забезпечує високу герметичність міжтрубного простору. Хоча така конструкція менш стійка до значних термічних напружень порівняно з апаратами з компенсаторами або плаваючою голівкою, для умов роботи у ферментаційній лінії виробництва лимонної кислоти, де температурні перепади зазвичай є помірними, її застосування є цілком обґрунтованим та економічно виправданим. Передбачається одноходова конфігурація по трубному простору для спрощення конструкції [2].

Обраний теплообмінник (рис. 2.1) складається з наступних основних вузлів та деталей. Кожух являє собою циліндричний корпус діаметром 600 мм,

					БІ-110750231-20 ПЗ	Лист
Змін.	Лист.	Ном. Док.	Підп.	Дата		22

виготовлений з нержавіючої сталі, всередині якого розміщується трубний пучок і циркулює лимонна кислота. Трубний пучок є основним елементом, де відбувається теплообмін; він складається з 257 гладких теплообмінних труб зовнішнім діаметром 25 мм і товщиною стінки 2 мм. Труби закріплені у двох трубних решітках методом зварювання, що забезпечує герметичність та міцність з'єднання. Загальна висота апарату становить 2644 мм, а довжина – 836 мм. У міжтрубному просторі встановлені сегментні перегородки, які не лише підтримують труби, запобігаючи вібрації, але й спрямовують потік теплоносія впоперек трубного пучка, що значно підвищує коефіцієнт тепловіддачі. Кришки з патрубками для входу та виходу теплоносія кріпляться до трубних решіток і забезпечують розподіл потоку по трубах.

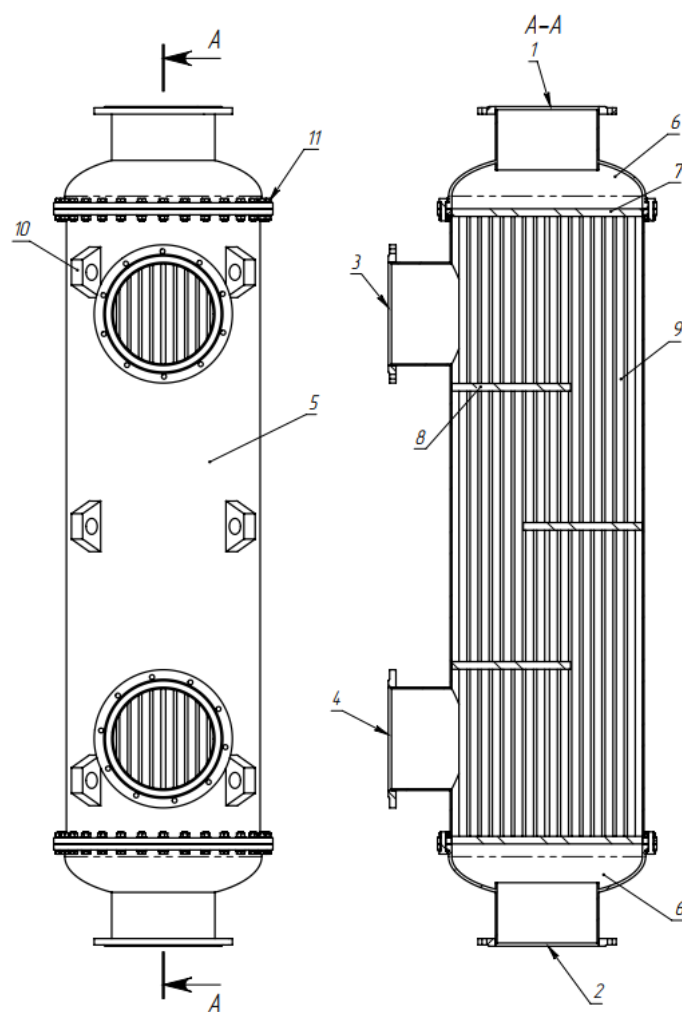


Рис 2.1 – передній вид та переріз розробленого вертикального кожухотрубного теплообмінника:

					БІ-110750231-20 ПЗ	Лист
Змін.	Лист.	Ном. Док.	Підп.	Дата		23

1 – штуцер входу ЛК; 2 – штуцер виходу ЛК; 3 – штуцер входу пари; 4 – штуцер виходу пари; 5 – кожух; 6 – кришка (днище); 7 – трубна решітка; 8 – перегородка; 9 – трубка; 10 – опори завіси; 11 – метизи кріплення.

Принцип дії розробленого кожухотрубного теплообмінника полягає у забезпеченні швидкого нагріву поживного середовища до температури стерилізації та його подальшій витримці при цій температурі протягом заданого часу. Попередньо підігріте поживне середовище подається через вхідний патрубок у трубний простір апарату. Оскільки апарат є одноходовим, середовище спочатку проходить через весь трубний пучок, нагріваючись до високої температури. У міжтрубний простір через патрубок на кожусі подається гріючий агент – гостра пара. Пара конденсується на зовнішній поверхні труб, інтенсивно передаючи тепло поживному середовищу всередині труб. Конструкція апарату розрахована таким чином, щоб загальний час проходження середовища через трубний пучок відповідав необхідному часу витримки при температурі стерилізації [3].

Таким чином, даний теплообмінник ефективно поєднує функції інтенсивного нагрівача та витримувача, виконуючи ключову роль у підготовці стерильного середовища.

Після розгляду загальної технологічної схеми виробництва лимонної кислоти стає очевидною ключова роль теплообмінного апарату (поз. 8) на етапі стерилізації. Для виконання відповідального завдання – нагріву середовища до високих температур та його подальшої витримки – необхідно було обрати конструкцію, що найкращим чином поєднує ефективність теплопередачі, експлуатаційну надійність та відповідність вимогам біотехнологічного виробництва. У даному проекті, після аналізу можливих варіантів, було вибрано кожухотрубний теплообмінник. Розглянемо детальне обґрунтування цього рішення, сильні та слабкі сторони обраної конструкції, а також її основні елементи та характеристики.

					БІ-110750231-20 ПЗ	Лист
Змін.	Лист.	Ном. Док.	Підп.	Дата		24

Кожухотрубні теплообмінники (КТ) здобули широке визнання завдяки низці суттєвих переваг:

- Універсальність та надійність апаратів, які здатні працювати в широкому діапазоні тисків (від вакууму до сотень атмосфер) та температур, а також з різноманітними, в тому числі агресивними або в'язкими, середовищами. Їх міцна конструкція забезпечує тривалий термін служби.
- Велика поверхня теплообміну, що дозволяє реалізувати значну площу теплопередачі в одному апараті, що важливо для інтенсивних процесів.
- Технологічність та ремонтпридатність їх виготовлення добре відпрацьована, а стандарти уніфікують конструкції. Багато типів КТ дозволяють проводити огляд, чистку та ремонт трубного пучка.
- Гнучкість проектування надають можливість варіювати кількість ходів, тип та крок розміщення труб, конфігурацію перегородок дозволяє оптимізувати апарат під конкретні умови експлуатації.

Разом з тим, кожухотрубні теплообмінники мають і певні недоліки порівняно, наприклад, з пластинчастими:

- Менша компактність — зазвичай вони мають більші габарити та вагу на одиницю потужності.
- Нижчий коефіцієнт теплопередачі (в деяких випадках). Питома ефективність теплообміну може бути нижчою, ніж у пластинчастих апаратів.
- Складність очищення міжтрубного простору, а особливо це стосується апаратів з нерухомими решітками.

Проте, для процесу стерилізації парою, де надійність та здатність працювати при високих температурах/тисках є пріоритетом, переваги КТ часто переважають недоліки [3].

У рамках проекту було обрано — вертикальний кожухотрубний теплообмінник з нерухомими трубними решітками (рис. 2.2).



Рис. 2.2 - Зображення згенероване в SolidWorks розширенням PhotoView 360.

Переваги такого вибору:

- Вертикальне виконання. Економить виробничу площу, може бути зручнішим для підключення трубопроводів та забезпечує кращий дренаж конденсату.
- Нерухомі трубні решітки. Це найпростіша, найнадійніша, з точки зору герметичності, та найдешевша конструкція. Відсутність внутрішніх рухомих ущільнень мінімізує ризик протікань.
- Один хід по трубах. Дозволяє збільшити швидкість руху середовища в трубах, простоту конструкції і експлуатування.

Недоліками обраної конструкції є:

					БІ-110750231-20 ПЗ	Лист
Змін.	Лист.	Ном. Док.	Підп.	Дата		26

- Чутливість до термічних напружень. Жорстке кріплення труб у решітках не дозволяє компенсувати різницю в термічному розширенні кожуха та труб, що може призвести до високих напружень при значних перепадах температур, це враховано при розрахунку на міцність та виборі матеріалів.
- Неможливість механічного очищення міжтрубного простору. Оскільки трубний пучок не виймається, очищення можливе лише хімічними методами.

Враховуючи, що умови стерилізації є відносно стабільними, а поживне середовище проходить попередню підготовку, очікується, що вказані недоліки не будуть критичними. Таким чином, вибір вертикального кожухотрубного теплообмінника з нерухомими трубними решітками є обґрунтованим компромісом між ефективністю, надійністю, вартістю та експлуатаційними характеристиками для вирішення задачі нагріву у лінії виробництва лимонної кислоти.

2.2 Порівняння ключових критеріїв обраної конструкції з аналогами

Для об'єктивної оцінки спроектованого кожухотрубного теплообмінника та підтвердження його переваг для умов лінії виробництва лимонної кислоти, необхідно провести порівняльний аналіз з іншими типами теплообмінних апаратів (табл. 3.1), що теоретично могли б бути використані для виконання подібних завдань. Ринок теплообмінного обладнання пропонує широкий спектр конструкцій, кожна з яких має свої сильні та слабкі сторони. Вибір оптимального варіанту завжди є компромісом, що базується на специфічних вимогах технологічного процесу [4].

Метою даного розділу є співставлення ключових технічних характеристик розробленого кожухотрубного апарату з трьома поширеними типами теплообмінників-аналогів: "труба в трубі", пластинчастим та спіральним. Таке порівняння дозволить чітко продемонструвати переваги обраної конструкції саме для процесу стерилізації поживного середовища

гострою парою, де ключовими факторами є не лише інтенсивність теплообміну, але й стійкість до високих температур, тисків, можливих гідроударів та загальна надійність конструкції.

На цьому тлі розроблений кожухотрубний виглядає як оптимальне рішення. Він поступається пластинчастому в компактності та "чистому" ККД, але значно перевершує його та спіральний апарат у надійності та стійкості до жорстких умов роботи з парою, компактніший за «труба в трубі». Використання дуплексної сталі AISI 321 забезпечує йому перевагу у міцності та корозійній стійкості. Таким чином, обраний теплообмінник пропонує найкращий баланс між властивостями.

Табл. 2.1 – Порівняння основних показників теплообмінників.

Тип апарату	Кожухотрубний , верт., 1-ход.	“Труба в трубі” (секційний)	Пластинчастий, розбірний	Спіральний, Тип 1
Призначення	Нагрів+витримка	Нагрів / Охолодження	Нагрів / Охолодження	Нагрів / Охолодження
Поверхня теплообм., м ²	35	~ 5 (на секцію) -> ~60 (12+ секцій)	~ 45	~ 55
Матеріал	AISI 321	08X18H10 Т	AISI 316L	AISI 316L
Коеф. теплопередачі, Вт/(м ² ·К)	1456	~ 1500	~ 3500	~ 2500

Габарити	2644×690×836 мм	Дуже громіздка система (велика площа)	1500×600×800 мм	1800×900×900 мм
Переваги	Висока міцність; Стійкість до пари, тиску, темп; Надійність; Оптим. баланс.	Простота; Стійкість до високого тиску.	Компактність; Найвищий ККД; Легкість очищення.	Компактність; Самоочищен ня; Стійкість до забруднень.
Недоліки	Більша вага/габарити; Складніше очищення труб.	Мала поверхня; Громіздкіс ть; Висока ціна.	Чутливість до гідроударів, темп., тиску; Ущільнення; Вища ціна.	Ціна; Складний ремонт; Обмеження по т/Р (порівняно з КТ).

2.3 Відомості про патентний пошук

Патентні дослідження є невід'ємним та критично важливим етапом будь-якої науково-дослідної та дослідно-конструкторської роботи, включаючи виконання дипломного проекту. Проведення ретельного аналізу патентної інформації дозволяє отримати об'єктивне уявлення про поточний рівень техніки у певній галузі, виявити ключові тенденції розвитку, уникнути ненавмисного дублювання вже існуючих технічних рішень та знайти нові, перспективні напрямки для вдосконалення. Крім того, патентний пошук є інструментом для попередньої оцінки новизни розробки та перевірки її патентної чистоти, що є важливим аспектом при потенційній комерціалізації чи впровадженні проекту.

					БІ-110750231-20 ПЗ	Лист
Змін.	Лист.	Ном. Док.	Підп.	Дата		29

У контексті даної дипломної роботи, присвяченої проектуванню лінії виробництва лимонної кислоти з розробкою кожухотрубного теплообмінника, патентні дослідження мали на меті вивчення існуючих патентів, що стосуються як технологій біосинтезу лимонної кислоти, так і конструкцій теплообмінних апаратів, зокрема кожухотрубних, що застосовуються у біотехнологічній, харчовій та хімічній промисловості. Особлива увага приділялася пошуку рішень, спрямованих на підвищення ефективності теплообміну, надійності обладнання, енергозбереження та оптимізації процесів стерилізації та ферментації.

Об'єктом пошуку виступає кожухотрубний теплообмінник. Серед знайдених джерел, було обрано: UA 133722 U, UA 133145 U, UA 130328 U, UA 128851 U, CN218673248U, CN221147290U, CN219368465U, та US20250146767.

Патент UA 133722U представляє конструкцію кожухотрубного теплообмінника з плаваючою головкою (рис. 2.2). Його будова включає кожух (1) з кришками (2, 8), трубний пучок, закріплений у трубній решітці (13), плаваючу головку (7), а також систему кільцевих (6) та дискових (5) перегородок для організації потоку в міжтрубному просторі. Ключовою особливістю цієї корисної моделі є встановлення біля вхідного (4) та вихідного (10) штуцерів міжтрубного простору спеціальних додаткових перегородок (12), які складаються з циліндричного та двох дискових фрагментів.

Основна задача, яку вирішує ця конструкція – це підвищення міцності апарату. Це досягається за рахунок того, що завдяки спеціальним перегородкам штуцери розташовуються за межами зони дії крайових навантажень, що виникають біля трубних решіток. Така конструкція змінює шлях потоку біля штуцерів, забезпечуючи більшу надійність та довговічність теплообмінника в умовах експлуатації.

подвійну функцію: вони турбулізують потік рідини всередині труб, руйнуючи пристінний шар, та збільшують фактичну поверхню тепловіддачі.

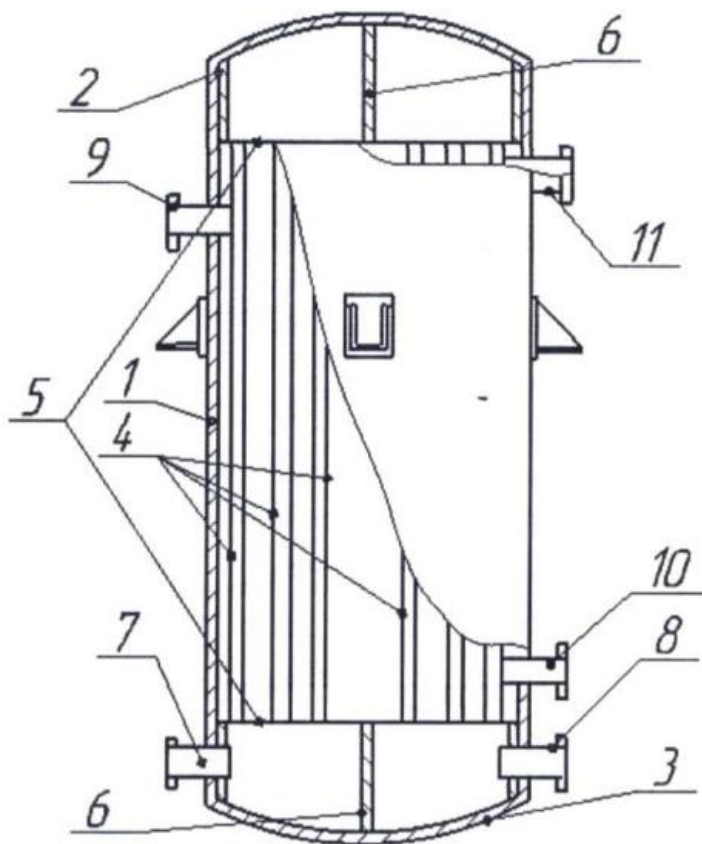


Рис. 2.4 – Загальний вигляд кожухотрубного теплообмінника:

1 – циліндричний кожух; 2 – кришка; 3 – днище; 4 – теплообмінні трубки; 5 – трубні решітки; 6 – перегородки; 7 – штуцер введення речовини; 8 – штуцер виведення речовини; 9 – штуцер введення теплоносія; 10 – штуцер виведення конденсату; 11 – штуцер відведення газів.

Змін.	Лист.	Ном. Док.	Підп.	Дата

БІ-110750231-20 ПЗ

Лист

33

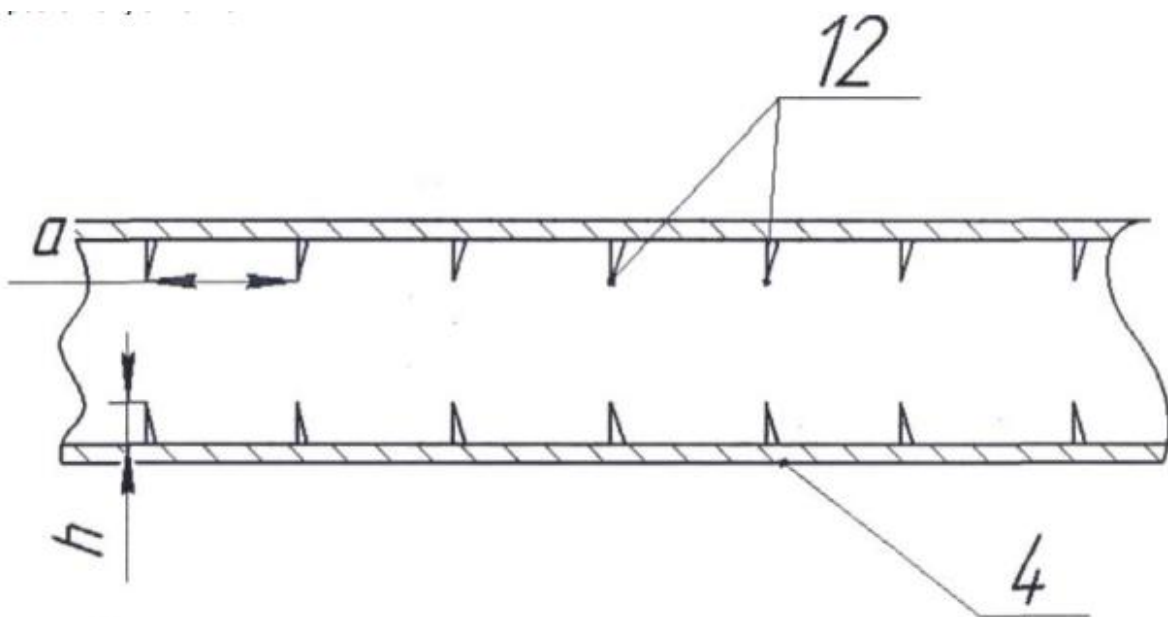


Рис. 2.5 – Поздовжній розріз теплообмінної трубки:

3 – теплообмінна трубка; 12 – голки; h – висота голки; a – крок між голками.

[\[https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/396158/\]](https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/396158/)

Як наслідок, значно зростає коефіцієнт теплопередачі та загальна продуктивність теплообмінника. Конструкція в іншому є типовою для багатоходового КТ з циліндричним кожухом, кришкою і днищем, що розділені перегородками для організації руху потоку через пучки трубок, закріплених у трубних решітках.

Наступний патент, UA 128851U пропонує конструктивне рішення для кожухотрубних теплообмінників (рис. 2.6), основною метою якого є зменшення тепловтрат у навколишнє середовище та оптимізація потоку в міжтрубному просторі.

Суть корисної моделі полягає у введенні додаткового елемента – внутрішньої обичайки (12). Ця обичайка має форму правильної шестигранної призми і розташовується всередині основного циліндричного корпусу (1) апарату, безпосередньо навколо трубного пучка (11). Простір (13), який утворюється між зовнішньою стінкою корпусу (1) та цією внутрішньою шестигранною обичайкою (12), заповнюється ефективним теплоізоляційним матеріалом, таким як пінополістирол.

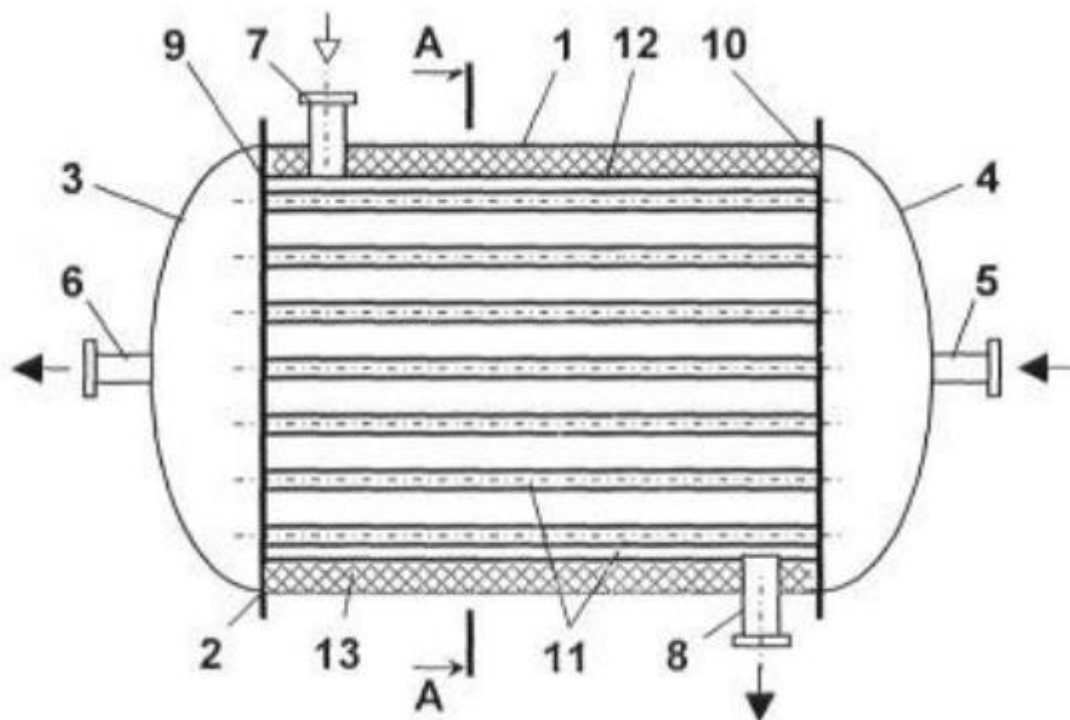


Рис. 2.6 – Кожухотрубний теплообмінник з внутрішньою теплоізоляцією:
 1 – обичайка корпусу; 2 – корпус; 3, 4 – кришки; 5, 6, 7, 8 – штуцери; 9, 10 –
 трубні решітки; 11 – теплообмінні труби; 12 – внутрішня шестигранна
 обичайка; 13 – теплоізоляційний матеріал.

[\[https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/237405/\]](https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/237405/)

Така конструкція дозволяє ізолювати зону теплообміну від зовнішніх стінок апарату, значно знижуючи втрати тепла в оточення. Крім того, шестигранна форма внутрішньої обичайки змушує потік теплоносія в міжтрубному просторі рухатися більш щільно навколо труб, що потенційно може зменшити кількість застійних зон та байпасних потоків, покращуючи ефективність теплообміну. Апарат також містить стандартні елементи: трубні решітки (9, 10), кришки (3, 4) та штуцери (5-8).

Китайський патент на корисну модель CN218673248U (рис. 2.7) фокусується не на інтенсифікації самого процесу теплообміну, а на покращенні експлуатаційних характеристик кожухотрубних теплообмінників. Основна мета – вирішити проблеми, пов'язані зі складністю заміни апаратів

напівкільця (4, 6). Ці напівкільця мають пази, що захоплюють спеціальні монтажні кільця (18) на корпусі та кришці і стягуються лише кількома болтами (12).

Такий підхід дозволяє значно спростити та прискорити процеси монтажу, демонтажу, чищення та ремонту теплообмінника, що підвищує його практичність та знижує експлуатаційні витрати.

Китайський патент CN221147290U пропонує рішення для підвищення герметичності та безпеки з'єднань кожухотрубних теплообмінників (рис. 2.8), особливо при їх послідовному (тандемному) підключенні. Проблема, на яку спрямований винахід, – це схильність традиційних з'єднань до витоків, що може призвести до небезпечних хімічних реакцій, викиду шкідливих речовин та негативного впливу на довкілля.

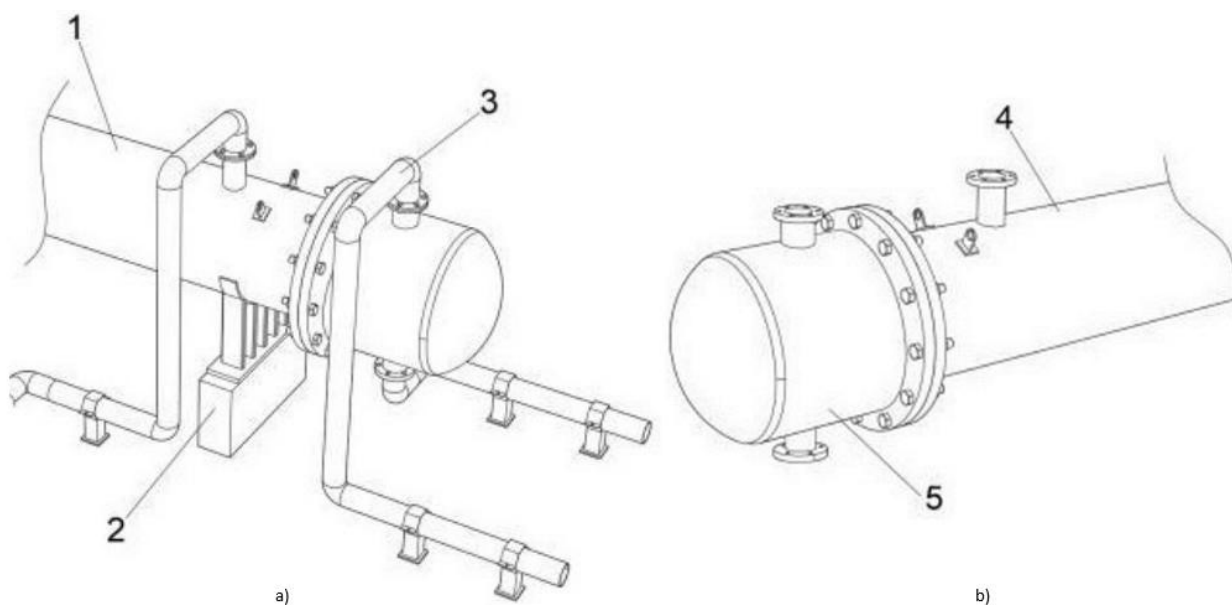


Рис. 2.8 – Тандемний кожухотрубний теплообмінник з покращеним ущільненням а): 1 – кожухотрубний теплообмінник; 2 – опорна база; 3 – серійний з'єднувальний трубопровід; б): 4 – ізоляційний кожух; 5 – з'єднувальний патрубков/головка.

[\[https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/091385263/publication/CN221147290U?q=pn%3DCN221147290U\]](https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/091385263/publication/CN221147290U?q=pn%3DCN221147290U)

Суть рішення полягає у використанні спеціальних з'єднувальних головок з удосконаленою системою ущільнення. Ці головки встановлюються на торцях теплообмінника, який може мати ізоляційний кожух. На з'єднувальних фланцях передбачені кільцеві канавки, в які встановлюються еластичні ущільнюючі кільця. Ключовою інновацією є те, що всередині цих еластичних кілець додатково розміщені компресійні пружини. Ці пружини створюють постійний радіальний тиск на ущільнююче кільце, забезпечуючи надійне та еластичне прилягання до канавок.

Патент CN219368465U представляє конструкцію високотемпературного кожухотрубного теплообмінника (рис. 2.9), що вирішує проблему потрапляння домішок у апарат разом з одним із теплоносіїв. Мета - зменшити кількість домішок, що входять у теплообмінник, та запобігти потенційним проблемам, пов'язаним з ними (забруднення, ерозія тощо).

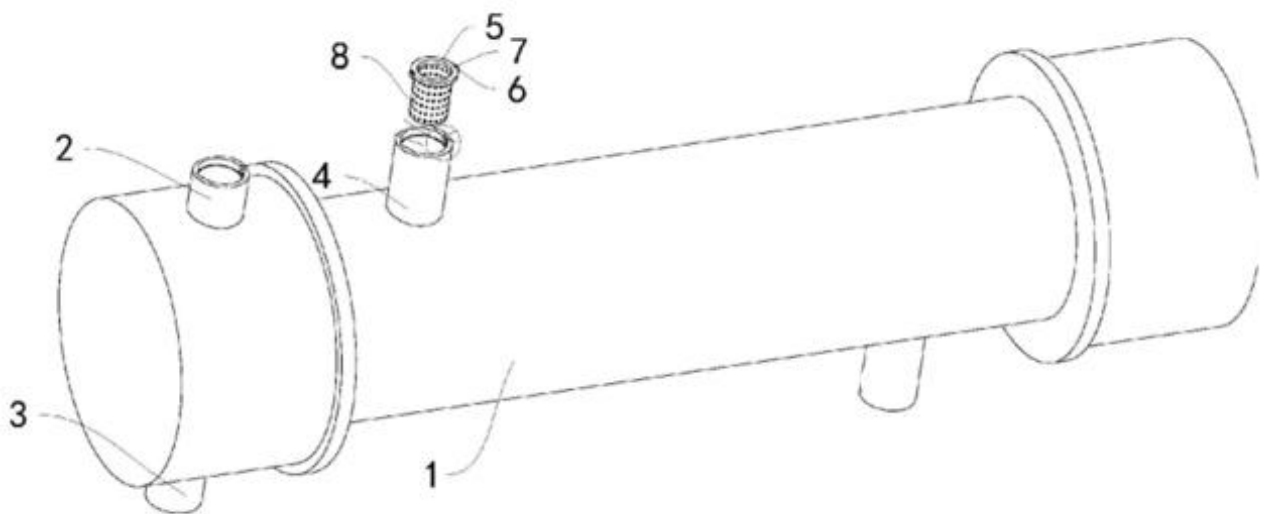


Рис. 2.9 – Вбудований фільтруючий вузол у патрубку КТ: 4 – другий вхідний патрубок; 5 – кільцева пластина; 6 – обмежувальний блок; 7 – різьбовий стрижень; 8 – фільтруюча сітка.

[\[https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/087137707/publication/CN219368465U?q=pn%3DCN219368465U\]](https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/087137707/publication/CN219368465U?q=pn%3DCN219368465U)

Рішення полягає у вбудовуванні фільтруючого вузла безпосередньо у вхідний патрубок одного з теплоносіїв. Цей вузол складається з кільцевої

Рішення полягає у використанні спіральних (гелікоїдальних) перегородок. Ключова особливість полягає в тому, що ці спіральні перегородки мають отвори двох типів для проходження труб: стандартні (перші) та отвори зі збільшеним діаметром або зазором.

Принцип дії базується на тому, що збільшені отвори навмисно створюють контрольований потік витоків між трубами та перегородкою. Цей витік, у поєднанні зі спіральним рухом основного потоку, дозволяє зменшити загальні втрати тиску, зберігаючи при цьому відносно високий коефіцієнт теплопередачі. Таким чином, досягається покращене співвідношення ефективності до гідравлічного опору [4].

Проведений аналіз відібраних патентних документів, що охоплюють різні аспекти вдосконалення кожухотрубних теплообмінників – від інтенсифікації теплообміну до підвищення міцності, покращення експлуатаційних характеристик та нових конструктивних рішень – дозволяє зробити висновок про високий рівень інноваційної активності в даній галузі та постійний пошук шляхів оптимізації конструкцій.

Водночас, жоден із проаналізованих патентів не описує конструкцію, яка б повністю відповідала розробленому в даному проекті теплообміннику. Хоча в розробці використані загальновідомі принципи кожухотрубних апаратів та їх елементів, конкретне поєднання обраних параметрів та специфічне застосування є індивідуальним для даного проекту. Знайдені патенти стосуються або інших конструктивних типів, або вирішують інші специфічні завдання.

3 Технічна характеристика

Дане обладнання, теплообмінник кожухотрубний, використовується з метою підігріву лимонної кислоти.

1. Середовище в апараті:

- У трубному просторі лимонна кислота (токсична, неагресивна);
- У міжтрубному просторі пара (не токсична, неагресивна).

2. Робоча температура, °C :

- Температура ЛК на вході в теплообмінник 19 °C ;
- Температура ЛК на виході з теплообмінника 55 °C .

3. Витрати ЛК:

- Об'ємна витрата 0,027 м³/с;
- Масова витрата 103 т/год.

4. Тиск в робочих умовах, МПа

0,2 МПа.

5. Контактна площа для теплообміну, м²

35 м².

6. Розміри за крайніми точками, мм :

- Висота 2644 мм ;
- Ширина 690 мм ;
- Довжина 836 мм .

7. Діаметр і товщина труб, мм

25x2 мм .

8. Загальна кількість труб, шт

257 шт .

9. Маса теплообмінника, кг

1088 кг .

4 Розрахунки, що підтверджують працездатність та надійність теплообмінника

4.1 Тепловий розрахунок апарату

Метою проведення теплового розрахунку є перевірка здатності обраної конструкції кожухотрубного теплообмінника забезпечити необхідну теплову потужність та кінцеві температури теплоносіїв при заданих умовах експлуатації.

Вихідні дані:

масові витрати лимонної кислоти	$G_k = 103 \frac{\text{т}}{\text{год}} = 28.61 \text{ кг/с};$
кінцева температура лимонної кислоти	$t_k = 55 \text{ }^\circ\text{C};$
початкова температура лимонної кислоти	$t_{\text{п}} = 19 \text{ }^\circ\text{C};$
концентрація розчину	$x = 17\%;$
тиск пари	$P_1 = 0.2 \cdot 10^6 \text{ Па};$

4.1.1 Знаходження теплового навантаження теплообмінника

Середня температура лимонної кислоти ($T_{\text{к,сеп}}$):

$$T_{\text{к,сеп}} = \frac{T_{\text{к,вх}} + T_{\text{к,вих}}}{2} = \frac{19^\circ\text{C} + 55^\circ\text{C}}{2} = \frac{74^\circ\text{C}}{2} = 37^\circ\text{C}, \quad (1)$$

де $T_{\text{к,вх}} = t_{\text{п}} \text{ }^\circ\text{C};$

$T_{\text{к,вих}} = t_k \text{ }^\circ\text{C}.$

Розрахована температура потрібна для визначення фізичних властивостей розчину:

коефіцієнт теплопровідності лимонної кислоти	$\lambda = 0.53 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К});$
питома теплоємність лимонної кислоти	$c = 3700 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К});$
значення густини лимонної кислоти	$\rho = 1065 \text{ кг}/\text{м}^3;$
динамічна в'язкість	$\mu = 0,0015 \text{ Па} \cdot \text{с}.$

Теплове навантаження апарату розраховують за рівняннями теплових балансів. Нехтуючи тепловими втратами, рівняння виглядає так:

$$Q = G_k \cdot c \cdot (t_n - t_k) = 28.61 \cdot 3700 \cdot 36 = 3.81 \text{ МВт}, \quad (2)$$

де G_k – масові витрати лимонної кислоти; c – питома теплоємність лимонної кислоти; $t_{п}$ – початкова температура лимонної кислоти; t_k – кінцева температура лимонної кислоти [6].

Витрату гріючої пари визначають на основі рівняння теплового балансу за наступною формулою:

$$G = \frac{Q}{r} = \frac{3809 \cdot 10^3}{2202 \cdot 10^3} = 1.73 \text{ кг/с}, \quad (3)$$

де $r = 2202$ кДж/кг - питома теплота конденсації.

4.1.2 Визначення коефіцієнта теплопередачі

Проведемо визначення характерного лінійного розміру. За ГОСТ 15120-79 обираємо трубу 25x2, отримуємо наступні значення:

- для течії всередині круглої труби: $d_B = 0,021$ м,
- для течії ззовні круглої труби: $d_3 = 0,025$ м,
- загальна площа прохідного перерізу $A_c = 0.04$ м².

Розрахунок об'ємної витрати лимонної кислоти:

$$V_k = \frac{G_k}{\rho} = \frac{28.61}{1065} = 0.027 \text{ м}^3 / \text{с}. \quad (4)$$

Розрахунок середньої швидкості лимонної кислоти:

$$\omega_k = \frac{V_k}{A_c} = \frac{0.027}{0.04} = 0.67 \text{ м/с}. \quad (5)$$

Розрахунок числа Рейнольдса, який визначає режим течії:

$$Re_k = \frac{\omega d_e \rho}{\mu} = \frac{15007.73}{1.15 \cdot 10^{-3}} = 13050. \quad (6)$$

При такому високому значенні числа Рейнольдса ($Re > 10000$), режим течії теплоносія в трубі є однозначно турбулентним.

Число Прандтля розраховується за формулою [6]:

$$Pr = \frac{c_p \cdot \mu}{\lambda} = Pr_k = \frac{4.255}{0.53} = 8.03. \quad (7)$$

Розрахунок числа Нуссельта:

$$Nu = 0.023 \cdot Re^{0.8} \cdot Pr^n = 0.023 \cdot 13050^{0.8} \cdot 8.03^{0.4} = 107, \quad (8)$$

де за рівнянням Діттуса-Больтера ($n=0.4$ для нагрівання).

Температурний напір для конденсації:

$$\Delta T = T_{нас} - T_{ст} = 120^{\circ}\text{C} - 55^{\circ}\text{C} = 65^{\circ}\text{C}, \quad (9)$$

де $T_{нас} = 120^{\circ}\text{C}$ – температура насичення пари.

Властивості насиченої водяної пари та конденсату (плівки) при відповідних температурах:

Розрахунок коефіцієнта від стінки труби до лимонної кислоти:

$$\alpha_k = \frac{(Nu_k \cdot \lambda_k)}{d_e} = \frac{107 \cdot 0.53}{0.021} = 2700 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К}). \quad (10)$$

Середня температура плівки конденсату:

$$T_{пл} = \frac{(T_{нас} + T_{ст,пара})}{2} = \frac{(120 + 55)}{2} = 87.5. \quad (11)$$

Властивості плівки конденсату (води) при $T_{пл} = 87.5^{\circ}\text{C}$:

коефіцієнт теплопровідності	$\lambda = 0.674 \text{ Вт} / (\text{м} \cdot \text{К});$
питома теплоємність	$c = 4203 \text{ Дж} / (\text{кг} \cdot \text{К});$
густина	$\rho = 966,8 \text{ кг} / \text{м}^3;$
динамічна в'язкість	$\mu = 0,000323 \text{ Па} \cdot \text{с}.$

Розрахунок критеріїв:

а) Критерій Галілея (Ga):

Характеризує співвідношення сил тяжіння та в'язкості в рідині.

$$Ga = \frac{g \cdot \rho_l^2 \cdot d_{зовн}^3}{\mu_l^2} = \frac{9.81 \cdot 934702.24 \cdot 1.5625 \cdot 10^{-5}}{1.04329 \cdot 10^{-7}} = 1.374 \cdot 10^{12}. \quad (12)$$

б) Критерій Прандтля для плівки конденсату (Pr_f) [5]:

Характеризує співвідношення між переносом імпульсу та переносом теплоти.

$$Pr_f = \frac{c_{pl} \cdot \mu_l}{\lambda_l} = \frac{4203 \cdot 0.000323}{0.674} = 2.014 \quad (13)$$

в) Критерій фазового переходу (Ku):

Цей критерій може мати різні форми. Одна з поширених форм, що відображає співвідношення прихованої теплоти до sensible heat (подібно до

оберненого числа Якобі), і враховує властивості плівки, може бути представлена як:

$$K_u = \frac{r}{c \cdot (T_{нас} - T_{ст, пара})} = \frac{2201500}{4203 \cdot 65} = 8.06. \quad (14)$$

Розрахунок числа Нуссельта (Nu) для однієї труби:

$$Nu_{D, прост} = 0.729 \left(\frac{g \cdot \rho_l \cdot (\rho_l - \rho_v) \cdot r \cdot d_{зовн}^3}{\mu_l \cdot \lambda_l \cdot (T_{нас} - T_{ст, пара})} \right)^{\frac{1}{4}} =$$

$$= 0.729 \left(\frac{9.81 \cdot 966.8 \cdot 965.671 \cdot (2201.5 \cdot 10^3) \cdot (0.025)^3}{0.323 \cdot 10^{-3} \cdot 0.674 \cdot 65} \right)^{\frac{1}{4}} = 1584.3, \quad (15)$$

де $(\rho_l - \rho_v) = 966.8 - 1.129 = 965.671 \text{ кг/м}^3$ - різниця густин конденсату і насиченої пари.

Розрахунок коефіцієнта тепловіддачі для однієї труби :

Інтенсивність теплообміну між парою та поверхнею стінки, коефіцієнт тепловіддачі [5]:

$$\alpha_{1, прост} = \frac{Nu_{D, прост} \cdot \lambda_l}{d_{зовн}} = \frac{1584.3 \cdot 0.674}{0.025} = 42712 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{°C)}. \quad (16)$$

Розрахунок величини теплопередачі для плоскої поверхні виконується так:

$$K = \frac{1}{1/\alpha_1 + \delta/\lambda_{ст} + 1/\alpha_2} = \frac{1}{1/42712 + 0.002/16.5 + 1/2700} = 1941.8 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{°C)}, \quad (17)$$

де δ - товщина стінки $\delta = 0.002 \text{ м}$;

$\lambda_{ст}$ - показник теплопровідності для матеріалу, з якого виготовлена стінка AISI 321 $\lambda_{ст} = 16.5 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°C)}$.

Коефіцієнт теплопередачі з урахуванням забруднень ($K_{забр}$) можна визначити, застосувавши коефіцієнт використання поверхні $\psi = 0.75$:

$$K_{сер, забр} = K_{сер, чист} \cdot 0.75 = 1941.8 \cdot 0.75 = 1456.4 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{°C)}. \quad (18)$$

4.1.3 Розрахунок площі поверхні теплообміну

Розрахуємо ΔT_1 та ΔT_2 для протиточної схеми:

					БІ-110750231-20 ПЗ	Лист
Змін.	Лист.	Ном. Док.	Підп.	Дата		45

ΔT_1 - на гарячому кінці теплообмінника, де пара входить, а кислота виходить:

$$\Delta T_1 = T_{\text{парі, вх}} - T_{\text{к, вих}} = 120^\circ\text{C} - 55^\circ\text{C} = 65^\circ\text{C}. \quad (19)$$

ΔT_2 - на холодному кінці теплообмінника, де конденсат виходить, а кислота входить:

$$\Delta T_2 = T_{\text{парі, вих}} - T_{\text{к, вих}} = 120^\circ\text{C} - 19^\circ\text{C} = 101^\circ\text{C}. \quad (20)$$

Формула для ΔT_{LMTD} :

$$\Delta T_{LMTD} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)} = \frac{65 - 101}{\ln\left(\frac{65}{101}\right)} = 81.7. \quad (21)$$

Для нашої схеми (протитік):

Кінець 1 (вхід пари, вихід кислоти):

$$\Delta T_{\text{гаряч.к.}} = 120^\circ\text{C} - 55^\circ\text{C} = 65^\circ\text{C}. \quad (22)$$

Кінець 2 (вихід конденсату, вхід кислоти):

$$\Delta T_{\text{холод.к.}} = 120^\circ\text{C} - 19^\circ\text{C} = 101^\circ\text{C}. \quad (23)$$

Тоді:

$$\Delta T_{LMTD} = \frac{\Delta T_{\text{холод.к.}} - \Delta T_{\text{гаряч.к.}}}{\ln\left(\frac{\Delta T_{\text{холод.к.}}}{\Delta T_{\text{гаряч.к.}}}\right)} = \frac{101^\circ\text{C} - 65^\circ\text{C}}{\ln\left(\frac{101}{65}\right)} = 81.7^\circ\text{C}. \quad (24)$$

Основне рівняння теплопередачі дозволяє нам визначити необхідну поверхню теплообміну [6]:

$$F = \frac{Q}{K_D \Delta t_{cp}} = \frac{3808692}{108816.649} = 35 \text{ м}^2. \quad (25)$$

Обираємо стандартний кожухотрубний теплообмінник згідно ГОСТ 15118-79 з наступними характеристиками:

Діаметр кожуха: $D_g = 0.6 \text{ м} = 600 \text{ мм}$.

Параметри труб:

- Діаметр труб x товщина стінки: $d \times s = 25 \times 2 \text{ мм}$.
- Число ходів: 1 шт .

- Загальне число труб: $n_T = 257 \text{ шт.}$
- Довжина труб: $l = 2 \text{ м} = 2000 \text{ мм.}$

Теплообмін та гідродинаміка:

- Поверхня теплообміну: $F_H = 40 \text{ м}^2.$
- Площа перерізу потоку у вирізі перегородок: $f_m = 0,009 \text{ м}^2.$
- Площа перерізу потоку між перегородками: $f_{mm} = 0,011 \text{ м}^2.$

Розрахунок діаметра трубної решітки:

Це діаметр кола, що охоплює всі труби в пучку. Він розраховується за емпіричною формулою:

$$D_b = d_0 \cdot \left(\frac{N_T}{K_1} \right)^{\frac{1}{n_1}} = 25 \cdot \left(\frac{257}{0.319} \right)^{\frac{1}{2.142}} = 568.44, \quad (26)$$

де $K_1 = 0.319, n_1 = 2.142.$

Розрахунок висоти трубної решітки:

Для сталі AISI 321 при температурі 37°C допустиме напруження буде дуже близьким до значення при 20°C. Згідно ГОСТ 34233.2-2017, допустиме напруження $[\sigma]$ при 20°C становить 157 МПа. Для температури 37°C це значення можна вважати актуальним, оскільки в такому малому діапазоні температур міцнісні характеристики суттєво не змінюються [6].

Розрахунок товщини трубної решітки:

$$h = K \cdot D_e \cdot \sqrt{\frac{P_{розр}}{\sigma_{дон} \cdot \varphi}} + c_k = 0.43 \cdot 600 \cdot \sqrt{\frac{0.2 \text{ МПа}}{157 \text{ МПа} \cdot 0.1872}} + 3 \text{ мм} = 24.28 \text{ мм}, \quad (27)$$

де $K=0.43$ – коефіцієнт;

$c = 3$ мм – надбавка на корозію;

$\varphi=0.1872$ – коефіцієнт міцності (ослаблення);

$P=0.2$ МПа – розрахунковий тиск, приймаємо як робочий.

4.2 Визначення і розрахунок конфігурації габаритів елементів, кріпильних деталей, модулів у зборі з подальшою перевіркою їхньої міцності.

4.2.1 Розрахунок елементів конструкції

Величина товщини стінки за розрахунком:

$$s_R = \frac{D_e \cdot P}{[\sigma] \cdot 2 \cdot \phi - P} = \frac{0,2 \cdot 0,6}{2 \cdot 157 \cdot 0,9 - 0,2} = 0,0004 \text{ м} = 0,4 \text{ мм}, \quad (28)$$

де ϕ – це коефіцієнт, що характеризує міцність зварного шва і залежить від його типу, $\phi = 0,9$.

Виконаємо розрахунок товщини стінки циліндричного кожуха (обичайки), що експлуатується в умовах внутрішнього тиску.

$$s = s_R + c_1 + c_2 + c_3 + c_4 = 0,4 + 0,5 + 0,4 + 3,7 = 5 \text{ мм}, \quad (29)$$

де c_1 - компенсаційний допуск корозійного зносу, який приймається рівним $c_1 = 0,5 \text{ мм}$;

c_2 - допуск, що враховує можливий мінусовий допуск на товщину матеріалу, прийнятий як $c_2 = 0,4 \text{ мм}$;

c_3 - компенсаційний допуск зношення, приймаємо $c_3 = 0,4 \text{ мм}$;

c_4 - допуск для округлення, мм .

Обчислимо площу, яку має внутрішній переріз даної труби [7]:

$$F_T = \frac{d_T^2 \cdot \pi}{4} - \frac{(d_T - 2s_T)^2 \cdot \pi}{4} = \frac{3,14 \cdot 0,025^2}{4} - \frac{3,14 \cdot (0,025 - 2 \cdot 0,002)^2}{4} = 1,44 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2, \quad (30)$$

де s_T – товщина стінки труби.

Обчислимо площу, яку має кожух у поперечному розрізі:

$$F_k = \frac{D_e \pi - \pi \cdot (D_e - 2s)^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 0,6 - 3,14 \cdot (0,6 - 2 \cdot 0,005)^2}{4} = 0,2 \text{ м}^2 \quad (31)$$

Розрахуємо тиск у трубах, що впливає на трубну решітку:

$$Q_T^1 = f_{mm} \cdot P + f_m \cdot P = 0,2 \cdot 0,011 + 0,2 \cdot 0,009 = 0,004 \text{ МН}. \quad (32)$$

Визначимо тиск корпусний, що діє на решітку трубного пучка:

$$Q_K^1 = \frac{Q_T^1 \cdot E_K \cdot F_K}{E_K \cdot F_K + E_T \cdot F_T} = \frac{0,004 \cdot 2,01 \cdot 10^5 \cdot 0,2}{2,01 \cdot 10^5 \cdot 0,2 + 2,15 \cdot 10^5 \cdot 1,44 \cdot 10^{-4}} = 0,004 \text{ МН}, \quad (33)$$

де E_K, E_T - Показники пружності (модулі) за Юнгом для матеріалу кожуха та матеріалу труб (окремо для кожного):

$$E_K = 2,01 \cdot 10^5 \text{ МПа}, E_T = 2,15 \cdot 10^5 \text{ МПа}.$$

Розрахуємо результуючу силу від дії тиску, яка прикладена до трубної решітки теплообмінника:

$$Q^1 = Q_T^1 + Q_K^1 = 0,004 + 0,004 = 0,008 \text{ МН}. \quad (34)$$

Проводимо розрахунок напружень для обичайки:

$$\sigma_K^1 = \frac{Q_K^1}{F_K} = \frac{0,004}{0,2} = 0,02 \text{ МПа}. \quad (35)$$

Напруження в трубі буде мати наступний вигляд:

$$\sigma_T^1 = \frac{Q_T^1}{F_T \cdot n_T} = \frac{0,004}{1,44 \cdot 10^{-4} \cdot 257} = 0,1 \text{ МПа}. \quad (36)$$

Вимога, що забезпечує міцність обичайки апарату:

$$\sigma_K^1 \leq [\sigma]_K \Rightarrow 0,02 \text{ МПа} \leq 157 \text{ МПа}. \quad (37)$$

Вимога, що забезпечує міцність труби пучка:

$$\sigma_T^1 \leq [\sigma]_T \Rightarrow 0,1 \text{ МПа} \leq 157 \text{ МПа}. \quad (38)$$

Розглянемо, як температурні коливання впливають на міцнісні характеристики теплообмінника. Для цього необхідно проаналізувати деформації, що виникають через різницю в температурних розширеннях матеріалів корпусу та труб [7]:

$$\delta_K = \alpha_K \cdot 3,5 \cdot (t_K - 20) = 16,9 \cdot 10^{-6} \cdot 3,5 \cdot (55 - 20) = 0,00207 \text{ м}, \quad (39)$$

де α_K - це показник теплового розширення для матеріалу обичайки апарату,

$$\alpha_K = 16,9 \cdot 10^{-6} \frac{1}{^\circ\text{C}};$$

t_K - це робоча температура стінки обичайки апарату, $^\circ\text{C}$.

$$\delta_T = \alpha_T \cdot 3,5 \cdot (t_T - 20) = 16,6 \cdot 10^{-6} \cdot 3,5 \cdot (81,7 - 20) = 0,0036 \text{ м}, \quad (40)$$

де α_T - це показник теплового розширення для матеріалу труби пучка,

$$\alpha_T = 16,6 \cdot 10^{-6} \frac{1}{^\circ C};$$

t_T - це робоча температура стінки труби пучка, $^\circ C$.

Визначимо тиск, який теплообмінні трубки чинять на трубну решітку:

$$Q_T^{II} = \frac{[a_K \cdot (t_K - 20) - a_T \cdot (t_T - 20)] E_K \cdot F_K \cdot E_T \cdot F_T}{E_K \cdot F_K + E_T \cdot F_T} =$$

$$= \frac{[16,9 \cdot 10^{-6} \cdot (81,7 - 20) - 16,6 \cdot 10^{-6} \cdot (55 - 20)] \cdot 2,01 \cdot 10^5 \cdot 0,2 \cdot 2,15 \cdot 10^5 \cdot 1,44 \cdot 10^{-4}}{2,01 \cdot 10^5 \cdot 0,2 + 2,15 \cdot 10^5 \cdot 1,44 \cdot 10^{-4}} = \quad (41)$$

$$= 0,01 \text{ МН}.$$

Навантаження від тиску з боку кожуха, що припадає на трубну решітку:

$$Q_K^{II} = Q_T^{II} = 0,01 \text{ МН}. \quad (42)$$

Тиск, що виникає внаслідок різниці температур:

$$Q_K^{II} = Q_T^{II} = 0,01 \text{ МН}. \quad (43)$$

Знайдемо величину напружень, що діють в корпусі [8]:

$$\sigma_K^{II} = \frac{Q_K^{II}}{F_K} = \frac{0,01}{0,2} = 0,05 \text{ МПа}. \quad (44)$$

Знайдемо величину напружень, що діють у трубці пучка апарату:

$$\sigma_T^{II} = \frac{Q_T^{II}}{F_T \cdot n_T} = \frac{0,01}{1,44 \cdot 10^{-4} \cdot 257} = 0,27 \text{ МПа}. \quad (45)$$

Вимога, що забезпечує міцність кожуха теплообмінника:

$$\sigma_K^{II} \leq [\sigma]_K \Rightarrow 0,05 \text{ МПа} \leq 157 \text{ МПа}. \quad (46)$$

Вимога, що забезпечує міцність теплообмінної трубки:

$$\sigma_T^{II} \leq [\sigma]_K \Rightarrow 0,27 \text{ МПа} \leq 157 \text{ МПа}. \quad (47)$$

З огляду на виконання умов міцності, можна констатувати, що апарат спроектовано для надійної та безперебійної роботи в заданих експлуатаційних умовах, без ризику пошкодження чи виникнення виробничих несправностей.

4.2.2 Обчислення параметрів і міцності еліптичного днища (еліптичної кришки)

Обираємо днище еліптичне із переліку стандартів.

Днище 530-10 ГОСТ 6533-78 (рис. 4.1).

значення напружень, які спостерігаються на поверхні днища теплообмінника.

Потрібно прийняти, як від'ємний робочий тиск, а саме: $\sigma_b = -P_2 = -0,2 \text{ МПа}$.

$$\sigma_a = \frac{P_2 \cdot D}{2 \cdot s} = \frac{0,2 \cdot 0,6}{2 \cdot 0,005} = 12 \text{ МПа}. \quad (51)$$

Умова:

$$12 \text{ МПа} < 140 \text{ МПа}, \quad (51)$$

отже, умова виконується.

4.2.3 Розрахунковий аналіз приєднувальних патрубків (штуцерів)

Визначимо умовний діаметр D_y штуцера для нашого теплообмінника, враховуючи задані умови експлуатації для лимонної кислоти А, Б:

$$D_y = \sqrt{\frac{4 \cdot V}{\pi \cdot w}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,027}{3,14 \cdot 0,67}} = 0,23 \text{ м}, \quad (52)$$

де w – розрахунковий показник швидкості, з якою рухається ЛК;

V – розрахункова об'ємна витрата ЛК, $\text{м}^3/\text{с}$.

Обираємо штуцери згідно наступного стандарту: АТК 24.218.06–90 (рис. 4.2). Приймаємо:

$D_y = 300 \text{ мм}$, $d_b = 328 \text{ мм}$, $D = 435 \text{ мм}$, $D_1 = 395 \text{ мм}$, $D_2 = 365 \text{ мм}$, $b = 20 \text{ мм}$, $h = 4 \text{ мм}$,
 $d = 22 \text{ мм}$, $n = 12 \text{ мм}$, $l = 180 \text{ мм}$, $H = 190 \text{ мм}$, $d_n = 325 \text{ мм}$, $S = 10 \text{ мм}$, маса = 24,3 кг.

Штуцер 300-0,6-1-1-190 AISI 321 АТК 24.218.06-90.

Для з'єднання для пари В, Г оберемо такий самий штуцер для уніфікації та стандартизації елементів [8].

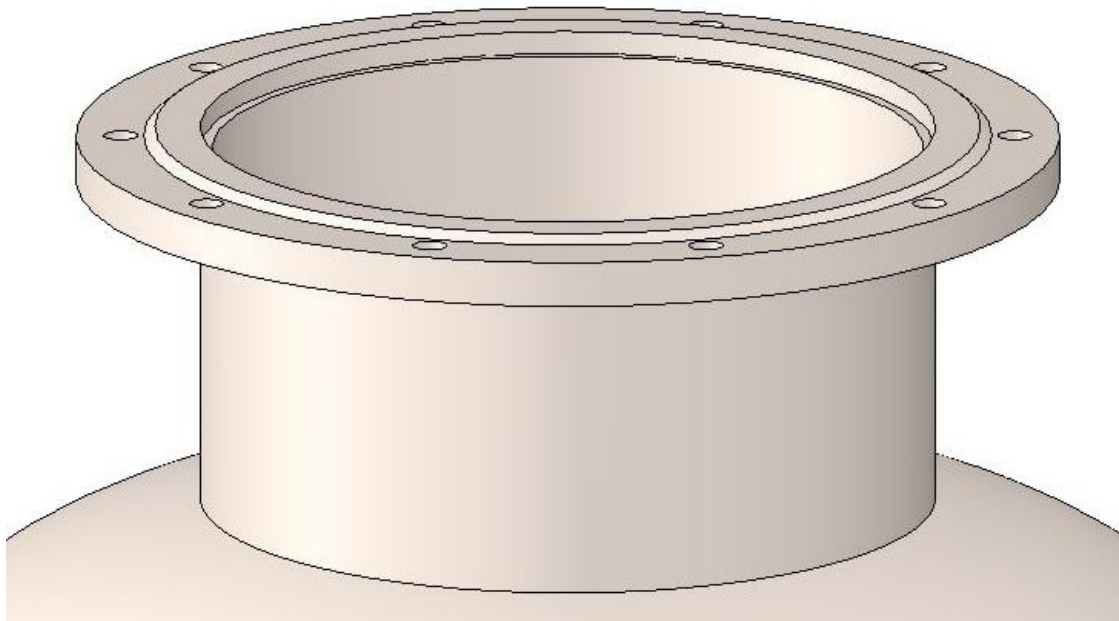


Рис. 4.2 – Змодельований обраний штуцер в SolidWorks.

4.2.4 Розрахунок фланцевих з'єднань теплообмінника

З'єднання А та Б на нашому теплообміннику, призначені для лимонної кислоти:

- Фланець 1-300-2,5 AISI 321 ГОСТ 12821-80.

Також, оберемо з'єднання на нашому теплообміннику, призначені для подачі В і виходу Г пари:

- Фланець 1-300-2,5 AISI 321 ГОСТ 12821-80.

$$D_y = 300\text{мм}, d_1 = 303\text{мм}, b = 16\text{мм}, h_4 = 45\text{мм}, D_m = 340\text{мм}, D_n = 330\text{мм}, \text{маса} = 13.38\text{кг}.$$

З метою з'єднання корпусу та днища теплообмінника було обрано плоский приварний фланець (рис. 4.3) 1-600-2,5 (сталь AISI 321 , ГОСТ 12820-80). Його переваги полягають у простій конструкції та тому, що приварювання до корпусу не супроводжується розбризуванням металу на поверхні. Для забезпечення герметичності при робочому тиску та температурі використовуються азбестові або металеві прокладки, розміщені між плоскими ущільнювальними поверхнями.

$$D_y = 600\text{мм}, d_1 = 602\text{мм}, b = 19\text{мм}, h_4 = 55\text{мм}, D_m = 650\text{мм}, D_n = 636\text{мм}, \text{маса} = 35.79\text{кг}.$$

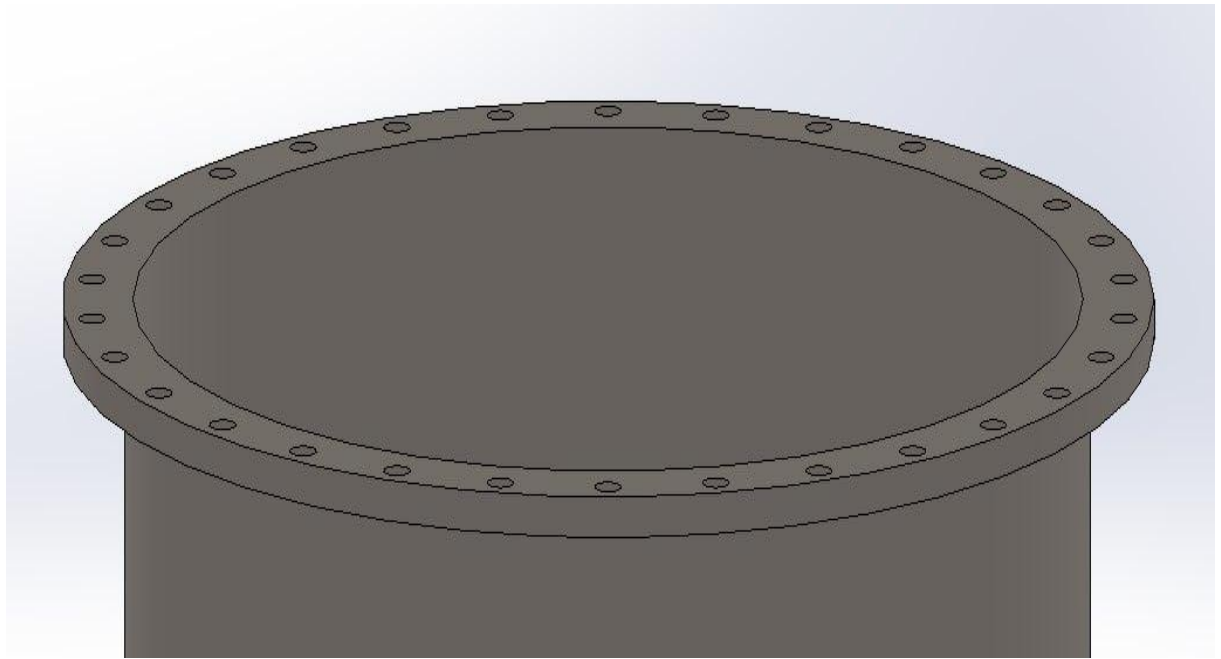


Рис. 4.3 – Змодельований обраний фланець.

4.2.5 Аналіз конструкції теплообмінника в SolidWorks

Оскільки всі ключові елементи конструкції успішно пройшли розрахунки на міцність та відповідають заданим умовам експлуатації, доцільно перейти до програмного аналізу основних компонентів теплообмінника. Варто зазначити, що розрахунок опорних лап на даному етапі не проводився. Їх вибір та остаточне конструктивне рішення буде визначено під час етапу комп'ютерного моделювання, де буде враховано сукупність усіх навантажень на апарат, що дозволить підібрати оптимальну конструкцію опор [9].

Наступним етапом є створення тривимірної твердотільної моделі теплообмінника у вибраному програмному середовищі SolidWorks. Процес моделювання починається з побудови окремих компонентів: створюються детальні моделі обичайки з урахуванням її діаметра та товщини стінки, моделюються фланці згідно зі стандартом та розрахунковими параметрами, а також розробляються попередні варіанти конструкції опорних лап. Після завершення моделювання окремих деталей, вони об'єднуються в єдину тривимірну збірку. Ця збірка стає основою для подальшого інженерного

аналізу, зокрема, для розрахунку на міцність методом скінченних елементів та визначення оптимальної конструкції опор.

Наведено детальний опис тривимірної моделі кожухотрубного теплообмінника, властивостей використаних матеріалів, прикладених граничних умов (закріплень) та навантажень, а також параметрів сітки елементів, що були використані для проведення статичного аналізу в середовищі SolidWorks Simulation.

Для кожного компонента теплообмінника в SolidWorks Simulation були задані відповідний матеріал. Важливо використовувати матеріали для межі текучості при робочій температурі.

Для імітації реальних умов експлуатації та забезпечення статичної визначеності моделі були задані наступні граничні умови (закріплення): опори теплообмінника були змодельовані як нерухомі закріплення (Fixed Geometry), що забороняють будь-які лінійні та кутові переміщення в місцях контакту з фундаментом.

В рамках статичного аналізу до моделі теплообмінника було прикладено основне робоче навантаження, а саме: тиск з боку пари (міжтрубний простір), який рівний $P = 0.2 \text{ МПа}$.

Місця прикладання: внутрішня поверхня кожуха, зовнішні поверхні трубок, поверхні перегородок та трубних решіток з боку міжтрубного простору.

Для дискретизації геометричної моделі та проведення розрахунку методом скінченних елементів була згенерована сітка.

Тип елементів: твердотільні тетраедричні елементи (Solid Tetrahedral Elements).

Параметри сітки: вище середнього (рис. 4.4).

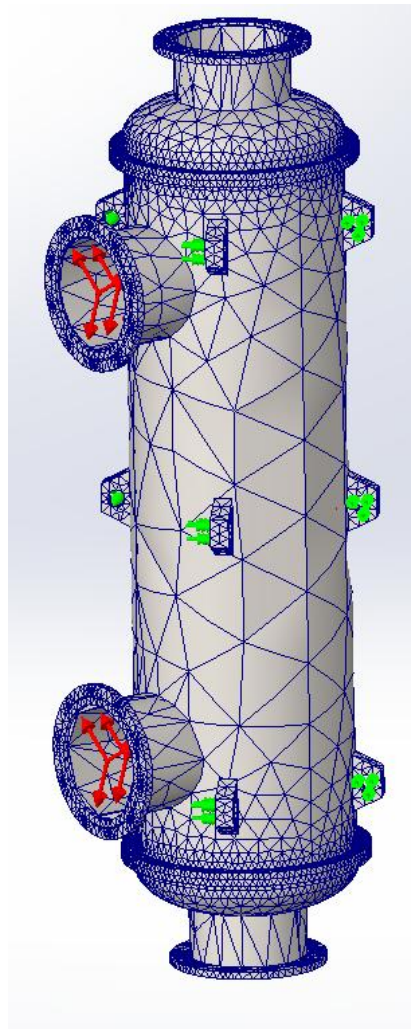


Рис. 4.4 - Сітка на моделі теплообмінника.

4.2.6 Результати розрахунку моделювання апарату

За результатами статичного аналізу, проведеного в SolidWorks Simulation, були отримані епюри напружень, загальних переміщень та еквівалентних деформацій. Ці дані дозволяють оцінити напружено-деформований стан конструкції теплообмінника під дією робочих навантажень.

Напруження (von Mises Stress)

Еквівалентні напруження є критерієм для оцінки міцності пластичних матеріалів. Аналіз цих напружень дозволяє визначити, чи не перевищують вони допустиму межу текучості матеріалу в будь-якій точці конструкції.

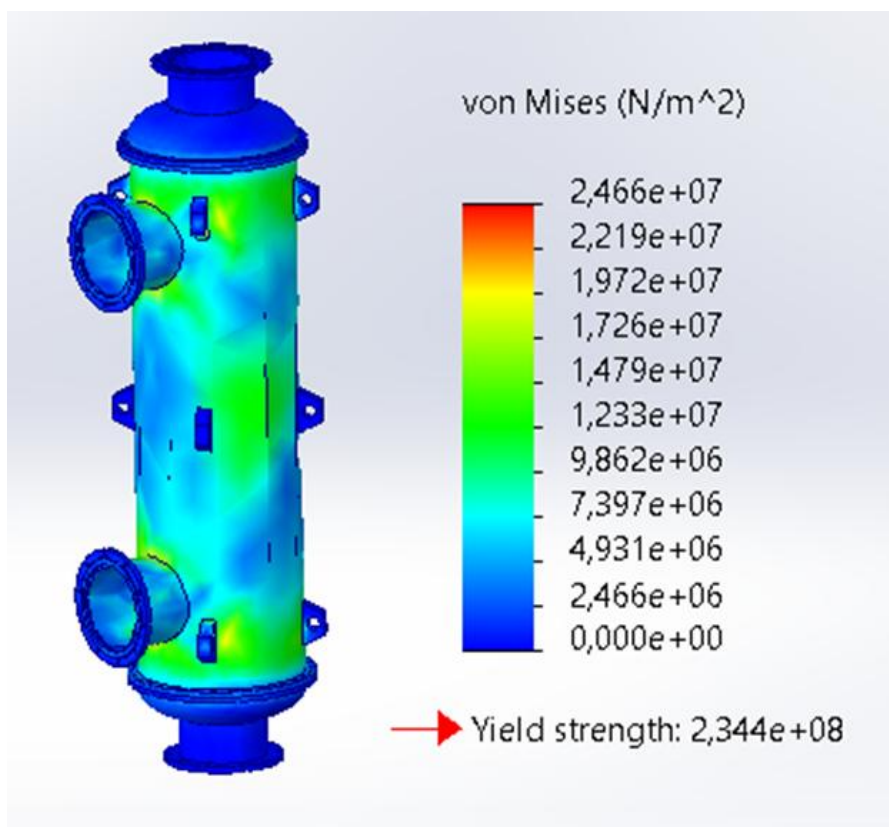


Рис. 4.5 – Епюра напружень.

На рис. 4.5 представлена епюра розподілу еквівалентних напружень в конструкції теплообмінника. Аналіз показує, що зони з підвищеними напруженнями спостерігаються в місцях з'єднання патрубків з кожухом, в кутових зонах трубних решіток, поблизу отворів під трубки в трубних решітках, на внутрішній поверхні кожуха.

Розподіл напружень в основних елементах конструкції, таких як кожух, трубні решітки та трубки зі сталі AISI 321, розподілені відносно рівномірно, з очікуваними піками в зонах концентрації. Це вказує на адекватну реакцію конструкції на прикладені тиски. Наприклад, в циліндричній частині кожуха та в трубках домінують розтягуючі напруження, що є характерним для посудин під тиском.

Напруження в критичних компонентах: трубні решітки і напруження тут, особливо в місцях з'єднання з кожухом та біля отворів для труб, досягають підвищених значень. З'єднання патрубків: ці зони демонструють підвищені

напруження, але вони залишаються в межах норми. Максимальне напруження, зафіксоване в моделі, становить: $2,46 \cdot 10^7 \text{Н/м}^2$.

Як видно з епюри, максимальні еквівалентні напруження в конструкції не перевищують межу текучості матеріалу $2,46 \cdot 10^8 \text{Н/м}^2$, з якого виготовлений теплообмінник.

Переміщення (Resultant Displacements)

Аналіз переміщень показує, як конструкція деформується під дією прикладених навантажень.

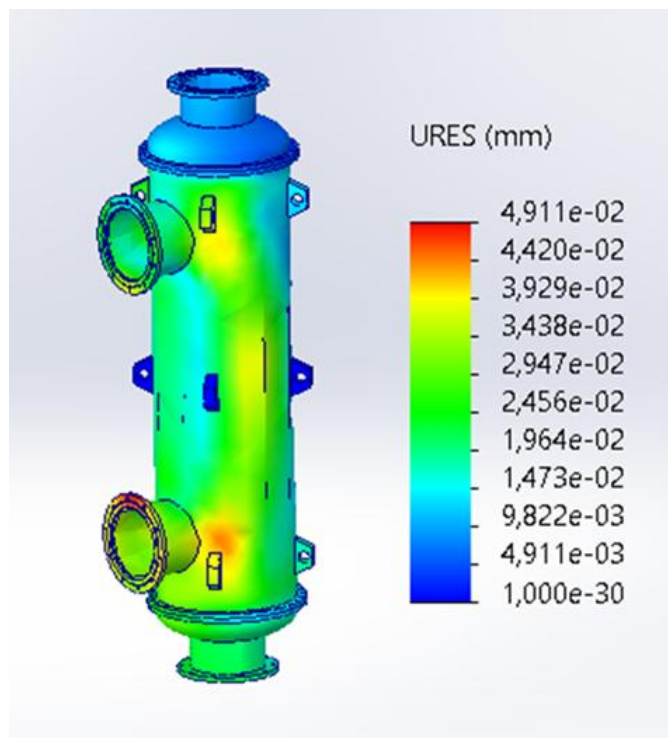


Рис. 4.6 - Епюра переміщень.

На рис. 4.6 представлена епюра розподілу загальних переміщень вузлів конструкції теплообмінника. Найбільші переміщення спостерігаються в центральній частині кожуха, на вільних кінцях патрубків, в центрі трубних решіток. Максимальне загальне переміщення, зафіксоване в моделі, становить: $U_{\max} = \text{мм}$. Важливо, що ці переміщення не призводять до порушення функціональності апарату, зіткнення його частин або втрати герметичності з'єднань.

Отримане максимальне значення переміщення є незначним і не впливає на працездатність теплообмінника, для даної конструкції, та не призводить до

контакту з іншими елементами системи або порушення герметичності роз'ємних з'єднань [9].

Деформації (Equivalent Strains)

Еквівалентні деформації показують відносне видовження або стиснення матеріалу. Вони корелюють з напруженнями через закон Гука в пружній області.

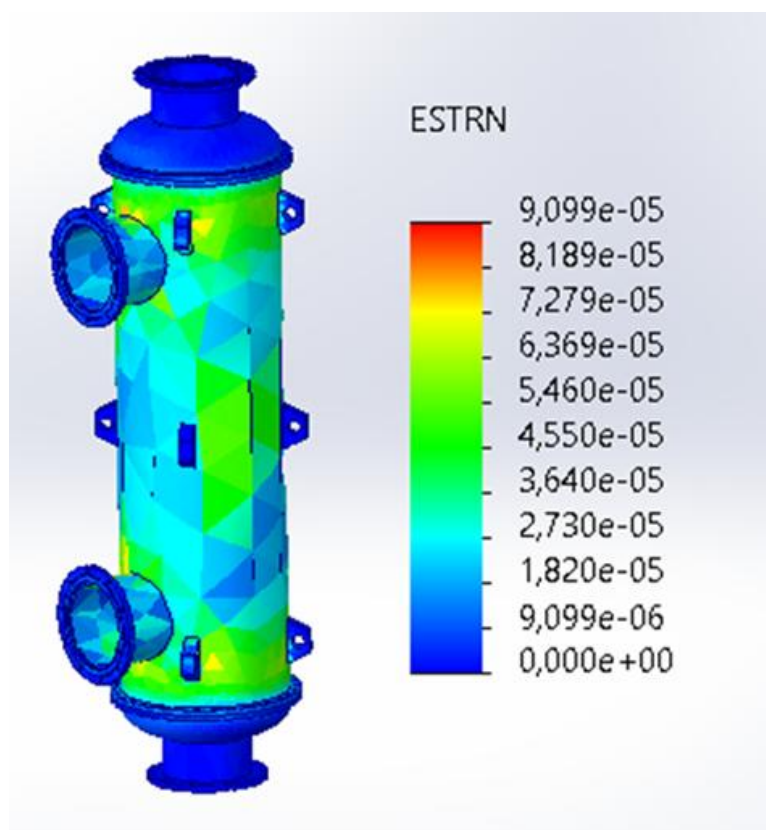


Рис. 4.7 - Епюра деформацій.

На рис. 4.7 представлена епюра розподілу загальних деформацій в конструкції теплообмінника. Розподіл зон з максимальними деформаціями в цілому відповідає розподілу максимальних напружень. Значення максимальної деформації є малими і це свідчить про те, що матеріал працює в зоні пружних деформацій, та узгоджується з отриманими значеннями напружень та переміщень. На основі проведеного статичного аналізу можна стверджувати, що конструкція кожухотрубного теплообмінника, виготовленого зі сталі AISI 321, є працездатною під дією заданих статичних навантажень.

розуміння внутрішніх процесів, що є критичним для оцінки ефективності конструкції та її можливої оптимізації.

Проведемо детальний аналіз результатів, отриманих за допомогою моделювання в SolidWorks Flow Simulation, у відповідності до поставлених цілей. Розглянемо характер потоків робочих середовищ, розподілу температур і ефективності теплообміну (рис.4.9).

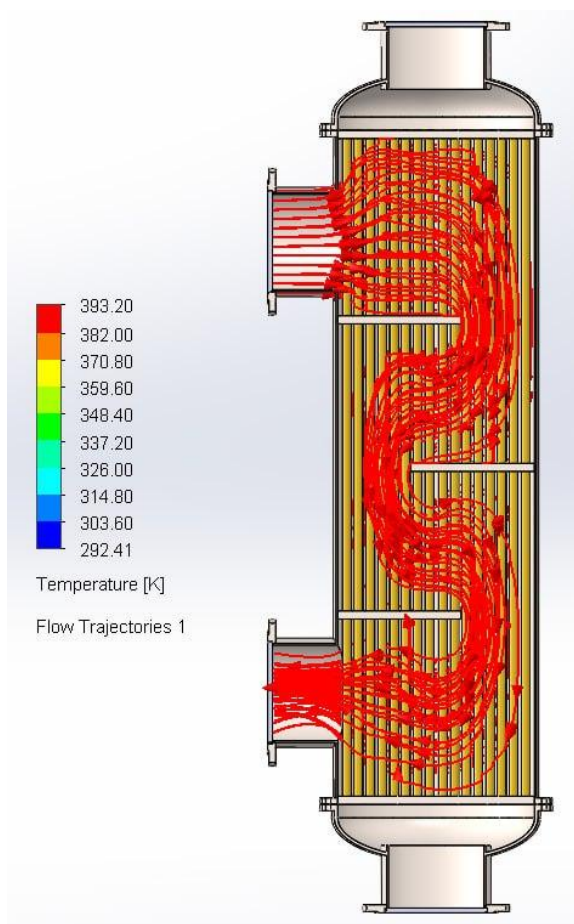


Рис. 4.9 - Потік пари у міжтрубному просторі.

Візуалізація потоку та робота перегородок, аналіз ліній току та полів швидкостей пари показав, що перегородки в цілому ефективно направляють потік пари поперек трубного пучка, змушуючи його багаторазово контактувати з поверхнею труб [9].

Спостерігається відносно рівномірний розподіл швидкості пари по більшій частині перерізу апарату, однак в зонах безпосередньо за перегородками, з боку напрямку потоку, були виявлені невеликі зони з нижчою швидкістю.

Візуалізація температурних полів (рис. 4.10) показує поступове та рівномірне нагрівання кислоти по мірі її руху по трубках. На виході з теплообмінника температура пари трішки зменшилась, отже, пара конденсується та, можливо, відбувається деяке переохолодження конденсату.

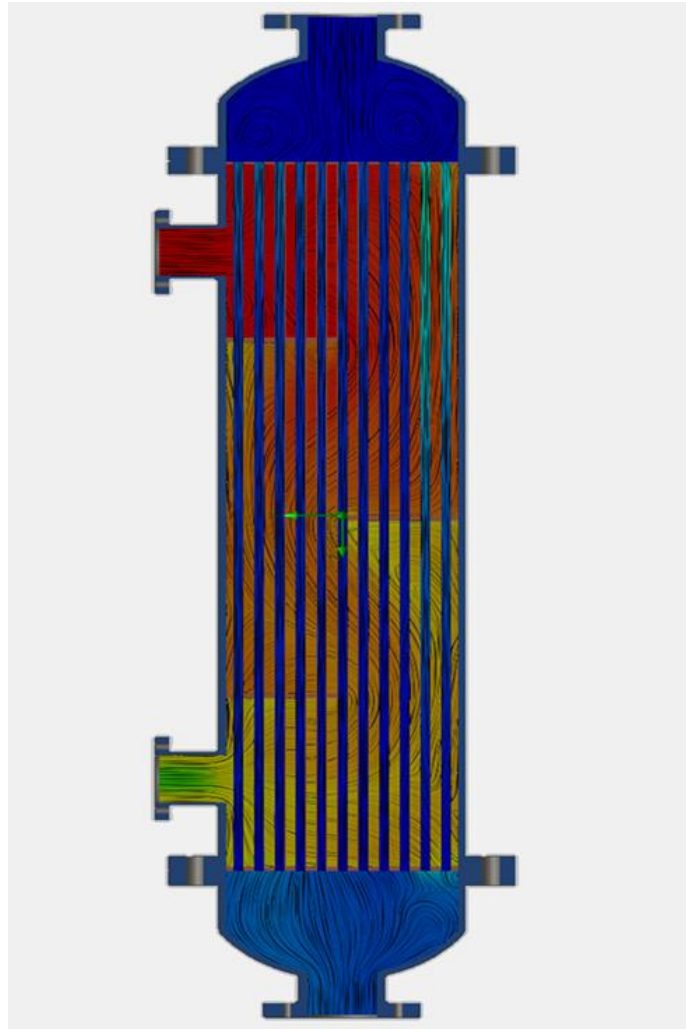


Рис. 4.10 - Потік пари і лимонної кислоти з епюрою температури.

Теплообмінник демонструє високу ефективність, забезпечуючи необхідний нагрів лимонної кислоти при заданих умовах.

Проведемо загальну оцінку та надамо можливі рекомендації:

- моделювання дозволило успішно візуалізувати потоки пари, оцінити температурні режими.
- конструкція з поперечними перегородками забезпечує достатньо інтенсивне перемішування потоку пари та хороший контакт з трубним пучком.

але й відносної рельєфності поверхні труб Δ . Приймаючи сталевих труб $\Delta = 0,00008\text{м}$, значення λ_0 обчислюється так:

$$\lambda_0 = 0,11 \cdot \left(\frac{\Delta}{d_T} + \frac{68}{\text{Re}} \right)^{0,25} = 0,11 \cdot \left(\frac{0,00008}{0,025} + \frac{68}{1,305 \cdot 10^4} \right)^{0,25} = 0,033. \quad (57)$$

4.4 Розрахунок на довговічність

Проведемо розрахунок на довговічність, враховуючи значення корозії. Припустимо, що швидкість корозії $V_{\text{кор}} = 0,05\text{мм} / \text{рік}$, що обґрунтовує помірну, помітну корозійну активність середовища для нержавіючої сталі.

Запишемо формулу для розрахунку терміну служби теплообмінника:

$$C = \frac{k}{V} = \frac{3}{0,05} = 60\text{років}, \quad (58)$$

де k – помірний припуск на корозію.

Наданий розрахунок показує, що навіть при агресивному середовищі, як лимонна кислота, прогнозований термін служби сильно залежить від конкретної швидкості корозії. За сприятливих умов він може бути довгим, але за наявності домішок або високої концентрації – значно скорочується, і з'являється серйозний ризик локальних видів корозії [9].

4.5 Оцінка на ремонтпридатність

Ремонтпридатність – це властивість теплообмінника, що полягає в його пристосованості до попередження, виявлення та усунення відмов і несправностей шляхом проведення технічного обслуговування та ремонту. Простіше кажучи, це те, наскільки легко, швидко та економічно доцільно можна відновити працездатність апарата.

Оцінка ремонтпридатності є важливим аспектом проектування, і нижче наведено аналіз можливих дефектів та методів ремонту для ключових компонентів розроблюваного теплообмінника:

– Трубний пучок, труби та їх кріплення до трубних решіток.

Найбільш ймовірні дефекти – це корозійні пошкодження труб, особливо через лимонну кислоту, течія в місцях кріплення труб до трубних решіток.

Методи ремонту - заглушка дефектних труб.

Оцінка ремонтпридатності: відносно легко, стандартний ремонт.

Опис: після зняття кришок теплообмінника забезпечується доступ до трубних решіток. Дефектні труби виявляються і глушаться спеціальними пробками з обох кінців.

Обмеженням є допустима кількість заглушених труб, зазвичай до 10-15% від загальної кількості - у нашому випадку 257 труб, тобто ~25-38 труб, без значного погіршення теплотехнічних характеристик. Потребує перевірки теплотехнічним розрахунком [9].

Ремонт з'єднання труба-трубна решітка.

Оцінка ремонтпридатності: середньої складності.

Опис: якщо теча виникає в місці зварювання, можливий ремонт зварного шва.

Ремонт: заміна окремих труб.

Оцінка ремонтпридатності: дуже складно, практично неможливо для конструкції з нерухомими трубними решітками без розрізання корпусу.

Опис: видалення та встановлення нової труби в такій конструкції є надзвичайно трудомістким і часто економічно недоцільним.

– Кожух та штуцери на кожусі.

Найбільш ймовірними дефектами є корозійні пошкодження, пошкодження зварних швів.

Методи ремонту: вирізання.

Оцінка ремонтпридатності: середньої складності.

Опис: локальні корозійні пошкодження або тріщини на корпусі та штуцерах можуть бути відремонтовані шляхом вирізання дефектної ділянки та приварювання латки або наплавкою. Сталь AISI 321 добре зварюється при дотриманні технології.

– Кришки та їх фланцеві з'єднання.

					БІ-110750231-20 ПЗ	Лист
Змін.	Лист.	Ном. Док.	Підп.	Дата		65

Найбільш ймовірними дефектами є - корозія внутрішніх поверхонь, пошкодження ущільнювальних поверхонь фланців, вихід з ладу прокладок.

Методи ремонту: заміна прокладок.

Оцінка ремонтпридатності: легко, стандартне обслуговування.

Методи ремонту: реконструкція ущільнювальних поверхонь фланців.

Оцінка ремонтпридатності: середньої складності – механічна обробка, іноді наплавка з проточкою.

Ремонт корозійних пошкоджень кришок.

Оцінка ремонтпридатності: середньої складності.

– Міжтрубні перегородки.

Найбільш ймовірними дефектами є – корозія, механічне пошкодження від вібрації.

Методи ремонту: заміна.

Оцінка ремонтпридатності: дуже складно, практично неможливо для конструкції з нерухомими трубними решітками без розрізання корпусу та виймання трубного пучка.

Опис: ремонт або заміна перегородок у такій конструкції не передбачена без капітальної розборки.

Основний доступний та економічно доцільний метод ремонту – заглушка дефектних труб. Це дозволяє продовжити термін служби апарата при виникненні окремих течей в трубах.

Ремонт елементів корпусу, кришок та фланцевих з'єднань (включаючи заміну прокладок) є цілком можливим завдяки зварюваності матеріалу AISI 321 та стандартній конструкції фланців.

Серйозні пошкодження трубного пучка, численні течі, значна корозія труб, або трубних решіток роблять ремонт складним та дорогим, часто підводячи до рішення про заміну всього теплообмінника [10].

Неможливість виймання трубного пучка обмежує можливості очищення міжтрубного простору та ремонту перегородок.

Теплообмінник має обмежену, але прийнятну ремонтпридатність для усунення найбільш поширених експлуатаційних дефектів, таких як течі окремих труб. Його ремонтпридатність значно підвищується завдяки використанню нержавіючої сталі AISI 321, яка добре піддається зварювальним ремонтним роботам. Однак, через агресивне середовище, частота виникнення корозійних пошкоджень може бути високою, що впливатиме на загальні витрати та доцільність ремонтів протягом життєвого циклу. Регулярний моніторинг стану, особливо товщини стінок труб та стану трубних решіток, є критично важливим.

					БІ-110750231-20 ПЗ	Лист
Змін.	Лист.	Ном. Док.	Підп.	Дата		67

5 Рекомендації щодо експлуатації та монтажу

Для забезпечення тривалої, безпечної та ефективної роботи розробленого кожухотрубного теплообмінника необхідно суворо дотримуватися правил його монтажу та експлуатації. Правильний монтаж є запорукою надійності всіх з'єднань та коректної роботи апарату, тоді як грамотна експлуатація дозволяє зберегти його технічні характеристики та запобігти передчасному виходу з ладу.

Перед початком монтажних робіт слід ретельно оглянути теплообмінник на предмет можливих пошкоджень, отриманих під час транспортування та зберігання, а також перевірити комплектність поставки згідно з технічною документацією, включаючи паспорт та креслення. Фундамент або опорні конструкції під вертикальний теплообмінник мають бути підготовлені відповідно до проектних вимог, забезпечуючи надійну основу та можливість точної вивірки апарату за вертикаллю [10].

Важливо забезпечити достатній вільний простір навколо теплообмінника для зручності монтажних робіт, подальшого обслуговування, огляду та можливого ремонту. Підйом та встановлення апарату на місце експлуатації слід проводити з використанням відповідних вантажопідіймальних механізмів та схем стропування, вказаних у проектній документації, уникаючи ударів та деформацій корпусу і патрубків. Після встановлення на фундамент, теплообмінник вивіряється за рівнем та надійно закріплюється.

Особливу увагу при монтажі слід приділити підключенню трубопроводів до входних та вихідних патрубків. Трубопроводи повинні бути змонтовані таким чином, щоб їх вага та можливі вібрації не передавалися на патрубки апарату, уникаючи виникнення додаткових напружень. Рекомендується встановлення компенсаторів на трубопроводах. Усі фланцеві з'єднання збираються з використанням відповідних ущільнювальних матеріалів, стійких до робочих температур та середовищ, забезпечуючи

					БІ-110750231-20 ПЗ	Лист
Змін.	Лист.	Ном. Док.	Підп.	Дата		68

рівномірне затягування кріпильних елементів. Також передбачається встановлення необхідної запірної та регулюючої арматури, контрольно-вимірювальних приладів та запобіжних пристроїв згідно з проектною схемою. Після завершення монтажу проводиться промивка системи та гідравлічні випробування на міцність і герметичність [11].

Перед пуском теплообмінника в роботу необхідно переконатися у справності всіх його елементів, арматури та КВП. Введення апарату в експлуатацію, особливо після тривалої зупинки, повинно здійснюватися поступово, з плавним доведенням параметрів до робочих значень. Це особливо важливо для апаратів з нерухомими трубними решітками для запобігання різким температурним перепадам та виникненню значних термічних напружень.

Під час експлуатації необхідно регулярно контролювати робочі параметри: температуру та тиск теплоносіїв, їх витрати, а також перепад тиску на апараті, що може свідчити про його забруднення. Важливо дотримуватися технологічного регламенту та не перевищувати максимально допустимі робочі параметри. Для запобігання інтенсивному утворенню накипу та корозії необхідно забезпечити належну якість теплоносіїв. Технічне обслуговування включає регулярні огляди, перевірку герметичності, а також періодичне очищення поверхонь теплообміну, переважно хімічними методами для міжтрубного простору, враховуючи конструкцію з нерухомими решітками. При плановій або аварійній зупинці слід також дотримуватися процедури поступового зниження температур та тисків, а при тривалій зупинці забезпечити повний дренаж рідин. Дотримання правил техніки безпеки при роботі з обладнанням під тиском та високою температурою є обов'язковим.

6 Рівень уніфікації та стандартизації

6.1 Важливість стандартизації й уніфікації

Стандартизація та уніфікація є ключовими принципами сучасного машинобудування та проектування обладнання. Стандартизація полягає у встановленні та застосуванні єдиних норм, правил та вимог до продукції, процесів та методів контролю з метою досягнення оптимального ступеня упорядкування в певній галузі. Уніфікація, як один із методів стандартизації, спрямована на раціональне скорочення типів, параметрів та розмірів виробів однакового функціонального призначення [11].

Значення цих процесів важко переоцінити. Впровадження стандартизації та уніфікації дозволяє:

- підвищити якість та надійність продукції за рахунок використання перевірених рішень, матеріалів та технологій;
- знизити собівартість проектування, виготовлення та експлуатації шляхом зменшення номенклатури деталей, використання типових технологічних процесів та скорочення витрат на індивідуальну розробку;
- забезпечити взаємозамінність вузлів та деталей, що значно спрощує ремонт та технічне обслуговування обладнання;
- скоротити терміни розробки та впровадження нової техніки, оскільки проектувальники можуть спиратися на вже існуючі стандартні рішення;
- полегшити співпрацю між різними підприємствами та забезпечити відповідність продукції міжнародним вимогам;
- підвищити безпеку експлуатації обладнання завдяки дотриманню встановлених норм та правил.

У контексті проектування теплообмінного обладнання, такого як кожухотрубний теплообмінник, використання стандартних елементів та підходів є особливо актуальним, оскільки це стосується роботи обладнання під тиском та при високих температурах [12].

					БІ-110750231-20 ПЗ	Лист
Змін.	Лист.	Ном. Док.	Підп.	Дата		70

6.2 Застосування стандартних виробів

При розробці конструкції кожухотрубного теплообмінника для лінії виробництва лимонної кислоти було приділено значну увагу використанню стандартних та уніфікованих компонентів та рішень, де це було технічно доцільно та економічно виправдано. Це стосується як вибору матеріалів, так і окремих конструктивних елементів:

- Для з'єднання кришок з корпусом та підключення трубопроводів були обрані стандартні плоскі приварні фланці, що відповідають вимогам ГОСТ 12820-80. Використання стандартних фланців гарантує їхню відповідність певним тискам та температурам, а також забезпечує сумісність з іншою стандартною арматурою та трубопроводами.
- Для трубного пучка обрано труби стандартного розміру 25x2 мм. Такі труби виготовляються згідно з відповідними стандартами ДСТУ ISO 1127:2014, що забезпечує контроль їх якості, відомі механічні властивості та доступність на ринку [12].
- Усі болти, гайки, шайби, що використовуються для фланцевих з'єднань та кріплення інших елементів, є стандартними виробами, що відповідають чинним ДСТУ ISO 4014:2004, ДСТУ ISO 4032:2004, та ДСТУ ISO 7089:2003 відповідно. Це спрощує їх підбір, закупівлю та заміну при необхідності.
- Основний конструкційний матеріал обичайки та труб та матеріал фланців є стандартизованим та уніфікованим AISI 321, властивості якого регламентовані відповідними стандартами. Це дозволяє точно проводити розрахунки на міцність та прогнозувати поведінку матеріалу в умовах експлуатації.
- Діаметри вхідних та вихідних патрубків обрані з урахуванням стандартних рядів умовних проходів, що полегшує їх приєднання до загальної технологічної системи.

					БІ-110750231-20 ПЗ	Лист
Змін.	Лист.	Ном. Док.	Підп.	Дата		71

- Розрахунки на міцність основних елементів виконувалися з використанням методик, що базуються на положеннях чинних стандартів для посудин та апаратів, що працюють під тиском [13].

6.3 Розрахунок на уніфікацію та стандартизацію

Виконавши моделювання апарату, запишемо загальне число деталей із зазначенням кількості стандартних та унікальних компонентів серед них відповідно: $N = 685$, $n_c = 670$, $n_y = 15$.

Визначимо показник стандартизації: $K_c = \frac{n_c}{N} = \frac{670}{685} = 0,98$.

Визначимо показник уніфікації: $K_y = \frac{n_y + n_c}{N} = \frac{15 + 670}{685} = 1$.

Застосування стандартизованих компонентів у машинобудуванні надає значні переваги. Насамперед, це сприяє зменшенню виробничих витрат та істотно спрощує процеси обслуговування. Також скорочуються затрати часу на виконання сервісних (або регламентних) робіт та ремонту як окремих елементів, так і теплообмінника в цілому. Важливою перевагою є повна взаємозамінність стандартизованих деталей, що усуває потребу у спеціалізованих інструментах для монтажу та демонтажу, тим самим підвищуючи загальну ефективність та спрощуючи всі пов'язані процеси. Ці фактори дають змогу виробникам та кінцевим користувачам отримувати дієвіші та економічно обґрунтовані варіанти задоволення конкретних вимог в обладнанні і технологіях [14].

Висновки

В ході виконання даного дипломного проекту було комплексно розглянуто теоретичні основи та практичні аспекти виробництва лимонної кислоти, проаналізовано ключові стадії технологічного процесу, особливу увагу приділено процесам теплообміну, що є невід'ємною частиною ефективного та контрольованого синтезу. Було вивчено різні типи теплообмінного обладнання, їхні конструктивні особливості, переваги та недоліки, а також специфіку їх застосування у біотехнологічній та хімічній промисловості. Детально досліджено технологію виробництва лимонної кислоти методом мікробної ферментації, зокрема етап стерилізації поживного середовища, де надійний теплообмін відіграє вирішальну роль.

Відповідно до поставленого завдання на дипломне проектування, було здійснено обґрунтування вибору та детальний розрахунок кожухотрубного теплообмінника, призначеного для нагріву та витримки поживного середовища. Обрано вертикальну конструкцію з нерухомими трубними решітками та одним ходом по трубному простору, що забезпечує ефективне використання площі та необхідні умови для теплопередачі. Використання кожухотрубного апарату для даного процесу є виправданим завдяки його надійності при роботі з паром як гріючим агентом, можливості роботи при високих температурах та тисках, а також відносній простоті конструкції.

Було проведено тепловий розрахунок, що дозволив визначити необхідну поверхню теплообміну (35 м²) та основні теплотехнічні характеристики. Конструктивний розрахунок включав визначення товщин стінок ключових елементів: кожуха – 5 мм, трубних решіток – 24 мм, та днища – 10 мм, з урахуванням необхідних припусків на корозію та мінусовий допуск. Як основний конструкційний матеріал для елементів, що контактують з агресивним середовищем та працюють при високих температурах, обрано нержавіючу сталь AISI 321, що забезпечує необхідну міцність та корозійну стійкість. Для трубного пучка використано 257 труб розміром 25x2 мм. Також

					БІ-110750231-20 ПЗ	Лист
Змін.	Лист.	Ном. Док.	Підп.	Дата		73

було розраховано та підібрано фланцеві з'єднання та кріпильні елементи згідно з чинними стандартами.

Для візуалізації розробленої конструкції та перевірки правильності компоновання основних вузлів було створено тривимірну твердотільну модель кожухотрубного теплообмінника в програмному середовищі SolidWorks. Моделювання включало побудову обичайки, трубних решіток, трубного пучка, кришок, патрубків та фланцевих з'єднань. На основі цієї моделі також було попередньо визначено конструкцію та розташування опорних лап, з урахуванням загальних габаритів та передбачуваних навантажень.

Проведено патентний пошук, який підтвердив актуальність обраного напрямку та індивідуальність розробленої конструкції в її конкретному виконанні для заданих умов. Розглянуто рекомендації щодо монтажу та експлуатації розробленого теплообмінника для забезпечення його надійної та довготривалої роботи.

Таким чином, в рамках дипломного проекту розроблено апаратурно-технологічну схему лінії виробництва лимонної кислоти та детально спроектовано ключовий елемент цієї лінії – кожухотрубний теплообмінник-стерилізатор. Виконані розрахунки підтверджують працездатність та надійність запропонованої конструкції, а вибір матеріалів та стандартних елементів забезпечує її технологічність та економічну доцільність.

Conclusions

In the course of this diploma project, the theoretical foundations and practical aspects of citric acid production were comprehensively examined. Key stages of the technological process were analyzed, with particular attention paid to heat exchange processes, which are an integral part of effective and controlled synthesis. Various types of heat exchange equipment, their design features, advantages, and disadvantages, as well as the specifics of their application in the biotechnological and chemical industries, were studied. The technology of citric acid production by microbial fermentation was investigated in detail, particularly the stage of nutrient medium sterilization, where reliable heat exchange plays a crucial role.

In accordance with the diploma project assignment, the selection was justified and a detailed calculation of a shell-and-tube heat exchanger, intended for heating and holding the nutrient medium, was carried out. A vertical design with fixed tube sheets and a single pass on the tube side was chosen, which ensures efficient use of space and the necessary conditions for heat transfer. The use of a shell-and-tube apparatus for this process is justified by its reliability when working with steam as a heating agent, its ability to operate at high temperatures and pressures, and the relative simplicity of its design.

A thermal calculation was performed, which allowed for the determination of the required heat exchange surface (35 m²) and the main thermotechnical characteristics. The structural calculation included determining the wall thicknesses of key elements: the shell – 5 mm, tube sheets – 24 mm, and the bottom head – 10 mm, taking into account necessary allowances for corrosion and negative tolerance. AISI 321 stainless steel was chosen as the main construction material for elements in contact with corrosive media and operating at high temperatures, ensuring the necessary strength and corrosion resistance. For the tube bundle, 257 tubes with a size of 25x2 mm were used. Flange connections and fastening elements were also calculated and selected in accordance with current standards.

					БІ-110750231-20 ПЗ	Лист
Змін.	Лист.	Ном. Док.	Підп.	Дата		75

To visualize the developed design and verify the correct assembly of the main units, a three-dimensional solid model of the shell-and-tube heat exchanger was created in the SolidWorks software environment. The modeling included the construction of the shell, tube sheets, tube bundle, covers, nozzles, and flange connections. Based on this model, the design and location of the support legs were also preliminarily determined, taking into account the overall dimensions and anticipated loads.

A patent search was conducted, which confirmed the relevance of the chosen direction and the individuality of the developed design in its specific implementation for the given conditions. Recommendations for the installation and operation of the developed heat exchanger were considered to ensure its reliable and long-term operation.

Thus, within the framework of the diploma project, an apparatus-technological scheme for a citric acid production line was developed, and a key element of this line – a shell-and-tube heat exchanger-sterilizer – was designed in detail. The performed calculations confirm the operability and reliability of the proposed design, and the choice of materials and standard elements ensures its manufacturability and economic feasibility.

					<i>БІ-110750231-20 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Змін.</i>	<i>Лист.</i>	<i>Ном. Док.</i>	<i>Підп.</i>	<i>Дата</i>		76

Література, використана у роботі

1. Пирог Т. П., Антонюк М. М., Скроцька О. І., Кігель Н. Ф. *Харчова біотехнологія: підручник* / Т. П. Пирог, М. М. Антонюк, О. І. Скроцька, Н. Ф. Кігель. – Київ: Ліра-К, 2019. – 426 с.
2. Савченко О. А., Грек О. В., Ніколаєнко М. С., Топчій О. А., Тимчук А. В. *Загальні технології харчової промисловості: підручник* / О. А. Савченко, О. В. Грек, М. С. Ніколаєнко, О. А. Топчій, А. В. Тимчук. – Київ: ЦП «Компринт», 2023. – 427 с.
3. Панченко Ю. В., Васильєв В. П., Воронов С. А. *Хімія, технологія та застосування харчових добавок, ч. 1: Конспект лекцій* / Ю. В. Панченко, В. П. Васильєв, С. А. Воронов. – Львів: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2020. – 92 с.
4. Ю.І. Сидоров, Р.Й. Процеси і апарати мікробіологічної промисловості. Частина III. Основи проектування мікробіологічних виробництв: підручник/ Ю.І. Сидоров, Р.Й. Влязло, В.П. Новіков. – Львів, Видання національного університету «Львівська політехніка». 2004р. – 199с.
5. А.П. Каплун, Е.М. Морозов, М.А. Олферова ANSYS в руках інженера: практичне керівництво. – М.: Едіторіал УУРС, 2003. –272 с.
6. Сидоров Ю.І. Процеси і апарати мікробіологічної та фармацевтичної промисловості. Технічні розрахунки. Приклади і задачі. Основи проектування/Навч. посібник / Ю.І. Сидоров, Р.Й. Влязло, В.П. Новіков. – Львів: «Інтелект-Захід», 2008. – 736 с.
7. Корнієнко Я.М. Процеси та обладнання хімічної технології: підручник/ Я.М. Корнієнко, Ю.Ю. Лукач, І.О. Мікульонок та ін. – Київ: НТУУ «КПІ», 2011.-Ч.1-416с.
8. Корнієнко Я.М. Процеси та обладнання хімічної технології: підручник/ Я.М. Корнієнко, Ю.Ю. Лукач, І.О. Мікульонок та ін. – Київ: НТУУ «КПІ», 2011.-Ч.2-416 с.

					БІ-110750231-20 ПЗ	Лист
Змін.	Лист.	Ном. Док.	Підп.	Дата		77

9. Лацинський А.А. Конструювання зварювальних хімічних апаратів. Довідник/ - Л.: Машинобудування, 1981. - 382 с.
- 10.С. П. Вислоух, О. В. Волошко, Г. С. Тимчик, М. В. Філіппова Комп'ютерне моделювання процесів і систем. Методи оптимізації: підруч. для здобувачів ступеня бакалавра за спеціальністю «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології», освітньо-проф. прогр. «Комп'ютерно- інтегровані системи та технології в приладобудуванні»; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 115.44 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. – 267 с.
- 11.Дубовий В. М., Кветний Р. Н., Михальов О. І., Усов А. В Моделювання та оптимізація систем: підручник – Вінниця : ПП «ТД«Еднльвейс», 2017. – 804 с. – ISBN 978-617-7237-23-4.
- 12.Потапов В.О., Поперечний А.М., Корнийчук В.Г. Моделювання процесів і обладнання харчових виробництв – Київ: «Центр навчальної літератури», 2019. – 312 с. – ISBN 978-611-01-0335-0.
- 13.Р.Н. Кветний, І.В. Богач, О.Р. Бойко та інші; за заг. Ред.. Р.Н.Кветного. Комп'ютерне моделювання систем та процесів. Метод обчислень. Частина 1 : навчальний посібник. – Вінниця : ВНТУ, 2013. – 191 с. ISBN 978-966-641-520-5.
- 14.Баль-Прилипко Л. В., Ніколаєнко М. С., Берник І. М., Швець О. В., Толок Г. А., Науменко Т. В., Рибчинський Р. С. *Стандартизація, метрологія, сертифікація та управління якістю: підручник* / За ред. Л. В. Баль-Прилипко. – Київ: НУБіП України, 2024. – 378 с.

					БІ-110750231-20 ПЗ	Лист
Змін.	Лист.	Ном. Док.	Підп.	Дата		78

Документація для дослідження патентів

Регламент пошуку № БІ11.0850231-10

Найменування теми: Кожухотрубний теплообмінник

Шифр теми: БІ11.0850231.000

Етап: Розробка та моделювання апарату та його складальних одиниць

Номер, дата завдання на проведення патентних досліджень:

БІ11.0850231.000, 20.04.25

Об'єкт пошуку: Винаходи, інноваційні та стандарти моделі

Предмет пошуку: Кожухотрубний теплообмінник

Мета пошуку інформації: визначення патентної чистоти розробленого апарату й ознайомлення з тенденціями розвитку проектування даного виробу.

Держави пошуку: Україна, Китай, США.

Регламент пошуку: 2018-2025

Класифікаційні індекси: UA 133722 U, UA 133145 U, UA 130328 U, UA 128851 U, CN218673248U, CN221147290U, CN219368465U, та US20250146767.

Джерела інформації: Патентна документація, зокрема описи до винаходів та офіційні видання патентних бюлетенів, інтернет ресурси:

<https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/simple/> , <https://worldwide.espacenet.com/patent/>.

Таблиця А.1 – Регламент пошуку

Об'єкт дослідження (назва, складові частини)	Цільове призначення інформаційного пошуку	Територія (країни) проведення пошуку	Індекси класифікації (МПК, УДК)	Глибина (період) ретроспективного пошуку	Використані інформаційні ресурси
Кожухотрубний теплообмінник	Дослідження спрямоване на визначення патентоспроможності створених пристроїв, перевірку їх патентної чистоти та виявлення основних напрямків розвитку технологій у цій сфері.	Україна, Китай, США.	МПК F28F 9/00, F28F 9/02, F28F 7/16, F28F 19/00	2018-2025	https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/simple/ , https://worldwide.espacenet.com/patent/ .

Таблиця А.2 – документація патентів для аналітичного огляду

Об'єкт розробки та його ключові компоненти	Патентний документ	
	Бібліографічні дані джерела	Статус патенту
1	2	3
КОЖУХОТРУБНИЙ ТЕПЛООБМІННИК З ПЛАВАЮЧОЮ ГОЛОВКОЮ	Патент № UA 133722 U Україна, МПК: B01D1/06 Кожухотрубний теплообмінник з плаваючою головкою / Кузнецова Аріна Дмитрівна, Гулієнко Сергій Валерійович. Опубл. 25.04.2019, бюл. № 8/2019.	Не діє
КОЖУХОТРУБНИЙ ТЕПЛООБМІННИК	Патент № UA 133145 U Україна, МПК: F28D7/16, F28F13/08 Кожухотрубний Теплообмінник / Шахунов Михайло Олександрович, Гулієнко Сергій Валерійович 25.03.2019, бюл. № 6/2019.	Не діє
КОЖУХОТРУБНИЙ ТЕПЛООБМІННИК	Патент № UA 130328 U Україна, МПК: F28D7/00, F28F1/40 Кожухотрубний теплообмінник. Автори: Ільєнко Анна Володимирівна, Степанюк Андрій Романович. Опубл. 10.12.2018, бюл. № 23/2018	Не діє

Продовження Таблиця А.2 - документація патентів для аналітичного огляду

<p>КОЖУХОТРУБНИЙ ТЕПЛООБМІННИК</p>	<p>Патент № UA 128851 U Україна, МПК: F28D7/00 Кожухотрубний теплообмінник. Автори: Андреев Ігор Анатолійович. Опубл. 10.10.2018, бюл. № 19/2018</p>	<p>Не діє</p>
<p>ОПОРНИЙ ВУЗОЛ КОЖУХОТРУБНОГО ТЕПЛООБМІННИКА ТА КОЖУХОТРУБНИЙ ТЕПЛООБМІННИК</p>	<p>Патент № CN218673248U Китай, МПК: F28D7/00. Опорний вузол кожухотрубного теплообмінника та кожухотрубний теплообмінник. Авторі: Цзяо Вейцзян. Опубл. 21.03.2021, бюл. № 20/2021</p>	<p>Діє</p>
<p>ТАНДЕМНИЙ КОЖУХОТРУБНИЙ ТЕПЛООБМІННИК</p>	<p>Патент № CN221147290U Китай, МПК: F28D7/16, F28F11/02, F28F9/26. Тандемний кожухотрубний теплообмінник. Авторі: Цзяо Вейцзян. Опубл. 14.06.2024, бюл. № 26/2024</p>	<p>Діє</p>
<p>ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНИЙ КОЖУХОТРУБНИЙ ТЕПЛООБМІННИК</p>	<p>Патент № CN219368465U Китай, МПК: F28D7/00, F28F19/01, F28F9/26. Високотемпературний кожухотрубний теплообмінник. Автори: Ван Мейган; Чжень Дунсю; Лу Цзюнчао. Опубл. 18.07.2023, бюл. № 23/2023</p>	<p>Діє</p>

Продовження Таблиця А.2 - документація патентів для аналітичного огляду

ТЕПЛООБМІННИК СПІРАЛЬНИМИ ПЕРЕГРІВКАМИ	ЗІ	Патент № US18937978A1 США, МПК: F28F 1/36. Теплообмінник зі спіральними перегрівками. Автори: Шериф Ельсайед, Річард Джібб, Роберто Гроппі, Гарі Подрєбарац. Опубл. 05.11.2024, бюл. № 24/2024	Діє
--	----	--	-----

Проведений детальний аналіз відібраної патентної документації, що охоплює винаходи та корисні моделі в галузі кожухотрубних теплообмінників за останні роки, дозволяє зробити низку важливих висновків щодо сучасного рівня техніки та тенденцій її розвитку. Виявлено, що інноваційна активність переважно сконцентрована на таких напрямках, як інтенсифікація процесів теплообміну, підвищення механічної міцності та надійності апаратів, а також покращення експлуатаційних характеристик, таких як спрощення монтажу/демонтажу, теплоізоляція та захист від домішок.

Таким чином, на підставі проведеного аналізу відібраних патентних джерел можна зробити попередній висновок про патентну чистоту розробленої конструкції кожухотрубного теплообмінника відносно цих конкретних документів. Це означає, що запропоноване технічне рішення, що є комбінацією відомих інженерних підходів, але з індивідуальними параметрами та для конкретного технологічного застосування, не містить ознак, які б прямо порушували права, що впливають зі згаданих патентів.

Додаток Б. Специфікації

Форм.	Зона	Поз.	Позначення	Найменування	Кіл.	Примітка
				<u>Документація</u>		
A2			Б1107.50231.000 СБ	Корпус. Складальне креслення	1	
				<u>Деталі</u>		
A2	1			Трубна решітка	2	
A2	2			Опори	12	
A2	3			Перегородки	3	
				<u>Стандартні вироби</u>		
		4		Обчайка 600-1 ГОСТ 15118-79	1	
		5		Труба 25x2 ДСТУ ISO 1127:2014	257	
		6		Штуцер 300-0,6-1-1-190 АТК 24.218.06-90	4	
				<u>Матеріали</u>		
				AISI 321		
				Дріт СВ-08ГС ГОСТ 2246		
				Електрод ГОСТ 9467-75		

Б1107.50231.001

Зм	Арк	Нодокум.	Підпис	Дата
Розроб.		Мороз О. А.		
Перев.		Остапеню Ж.І.		
Н.контр.				
Завт.		Мельник В.М.		

Корпус

Арк.	Аркцш	Аркцшів
	1	1

КПІ ім. Ігоря Сікорського
ФБТ, БІ-11

Форм.	Зона	Поз.	Позначення	Найменування	Кіл.	Примітка
				<u>Документація</u>		
A2			Б1107.50231.000 СБ	Кришка. Складальне креслення	1	
				<u>Стандартні вироби</u>		
		1		Фланець 1-300-2,5 ГОСТ 12820-80	1	
		2		Штуцер 300-0,6-1-1-190 АТК 24.218.06-90	1	
		3		Днище 530-10 ГОСТ 6533-78.	1	
				<u>Матеріали</u>		
				AISI 321		
				Електрод ГОСТ 9467-75		

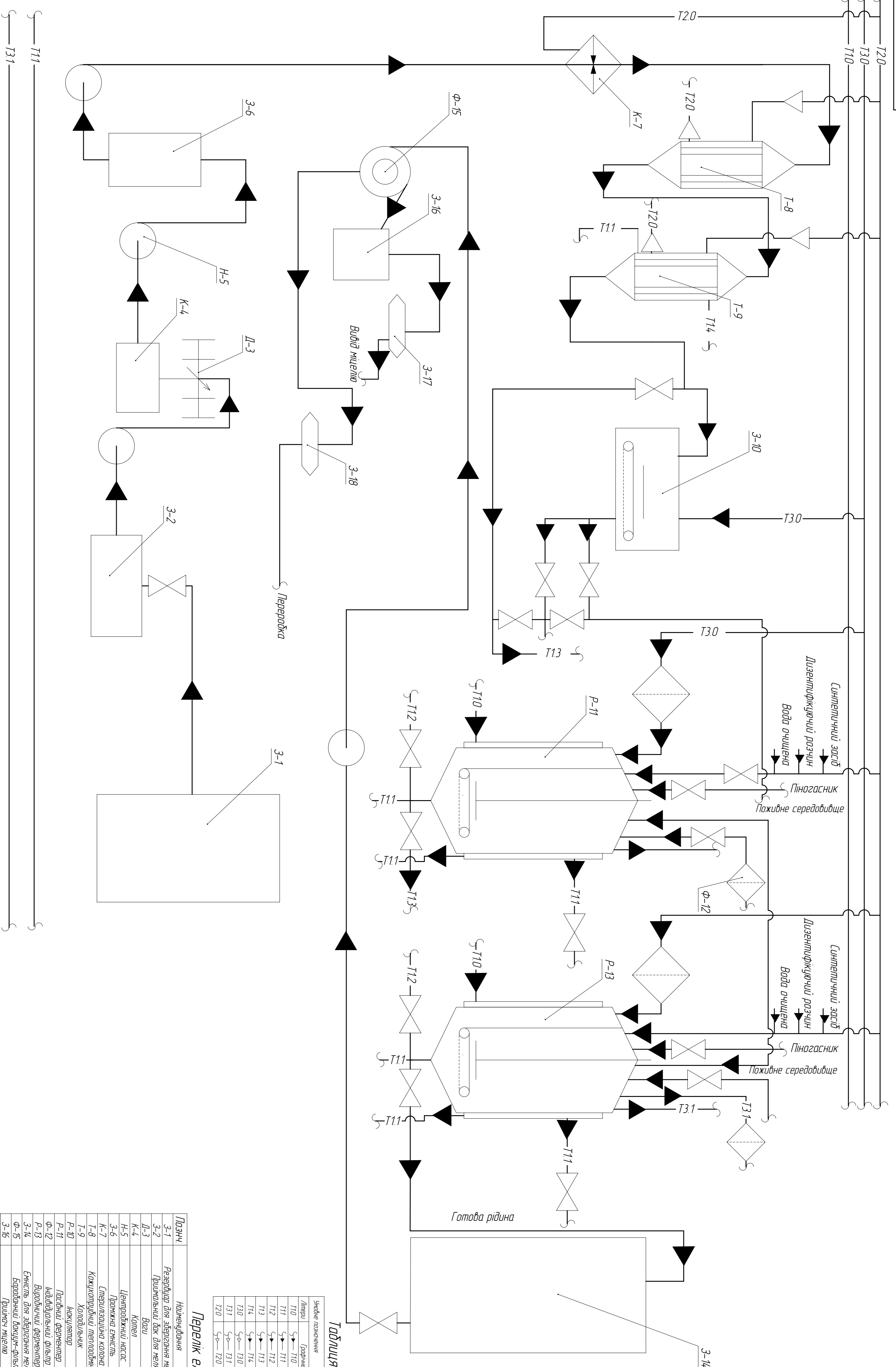
Б1107.50231.002

Зм	Арк	Нодокум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Мороз О. А.			Кришка	Арк.	Аркцш	Аркцшів
Перев.		Остапенко Ж.І.					1	1
Н.контр.						КПІ ім. Ігоря Сікорського ФБТ, БІ-11		
Зав.		Мельник В.М.						

Відомість дипломного проекту

№з/п	Зона	Форм.	Позначення	Найменування	Кіл.	Примітка.
1		A4		Завдання на дипломний проект	1	
2		A4	БІ-110750231-20 ПЗ	Пояснювальна записка	79	
3		A1	БІ-110750231-20 АС	Апаратурно-технологічна схема	1	
4		A1	БІ1107.50231.000 СБ	Кожухотрубний теплообмінник. Складальне креслення	1	
5		A2	БІ1107.50231.001 СБ	Корпус. Складальне креслення	1	
6		A2	БІ1107.50231.002 СБ	Кришка. Складальне креслення	1	

БІ1107.50231.000.00				
	ПІБ	Підпис	Дата	
Розроб.	Мороз О. А.			Лінія виробництва лимонної кислоти з розробкою теплообмінника кожухотрубного
Керівник	Остапенко Ж.І.			
Консульт				
Н.контр.				
Зав. каф.	Мельник В.М.			
		Арк.	Аркцш	Аркцшів
			1	1
КПІ ім. Ігоря Сікорського ФБТ, БІ-11				



Таблиця трубопроводів

Ущобне позначення	Середовище
Линия	Найменування
T10	Вода
T11	Вода стічна
T12	Конденсат
T13	Культивувальна рідина
T14	Вода гаряча
T30	Підлога очищене
T31	Відрацьоване надлиг
T20	Тара

Перелік елементів схеми

Познач.	Найменування	Кіл.	Примітка
3-1	Резервуар для зберігання молока	1	
3-2	Придатковий бак для молока	1	
Д-3	Ваги	1	
К-4	Центрований насос	1	
Н-5	Проміжна ємність	1	
3-6	Стерилізаційна камера	1	
К-7	Кожухотрубний теплообмінник	1	
Т-8	Холодильник	1	
Т-9	Насос	1	
Р-11	Пастеризувальний ферментер	1	
Р-12	Вихідний фільтр	4	
Ф-12	Ємність для зберігання молока	1	
3-14	Вихідний насос	1	
Ф-15	Вихідний фільтр	1	
3-16	Придатковий бак	1	
3-17	Вихідний насос	1	
3-18	Вихідний фільтр	1	

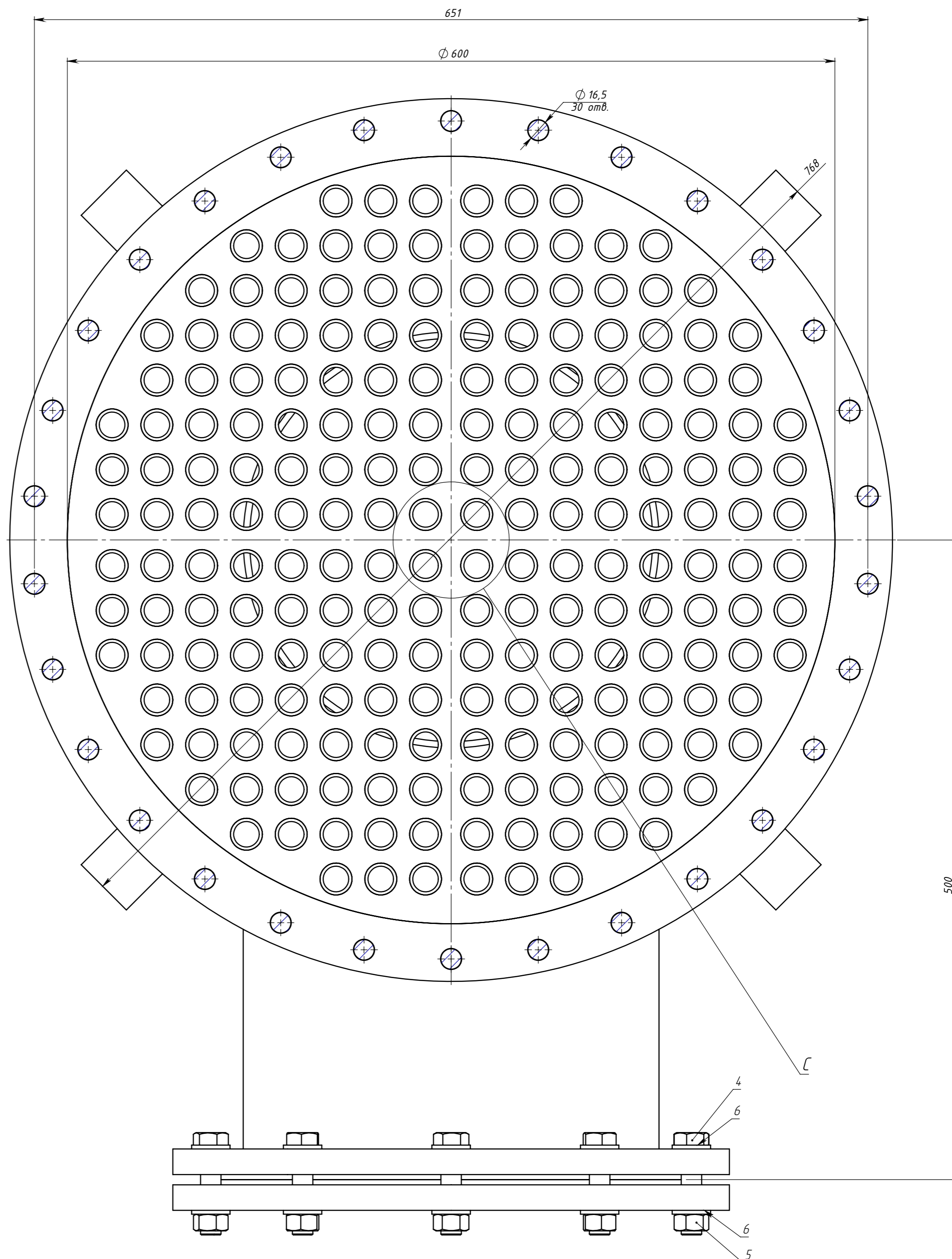
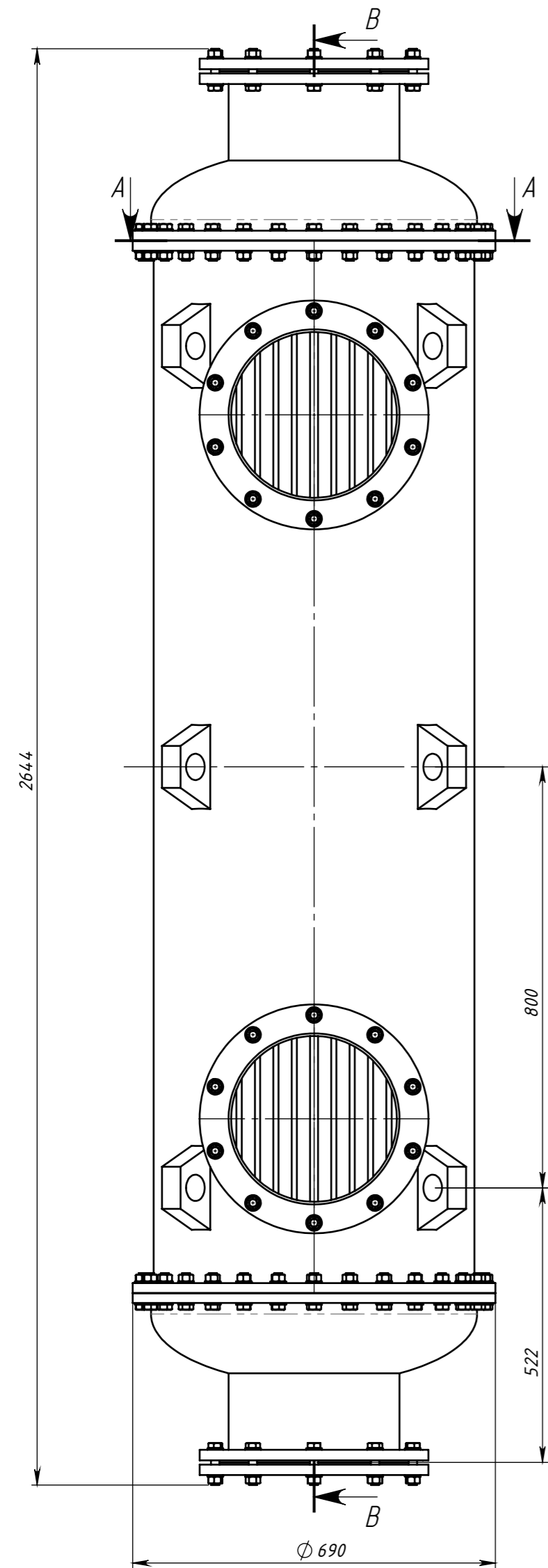
БІ-10750231-20 АС

Лінія виробництва
ЛІМОННОЇ КУСИЛКИ

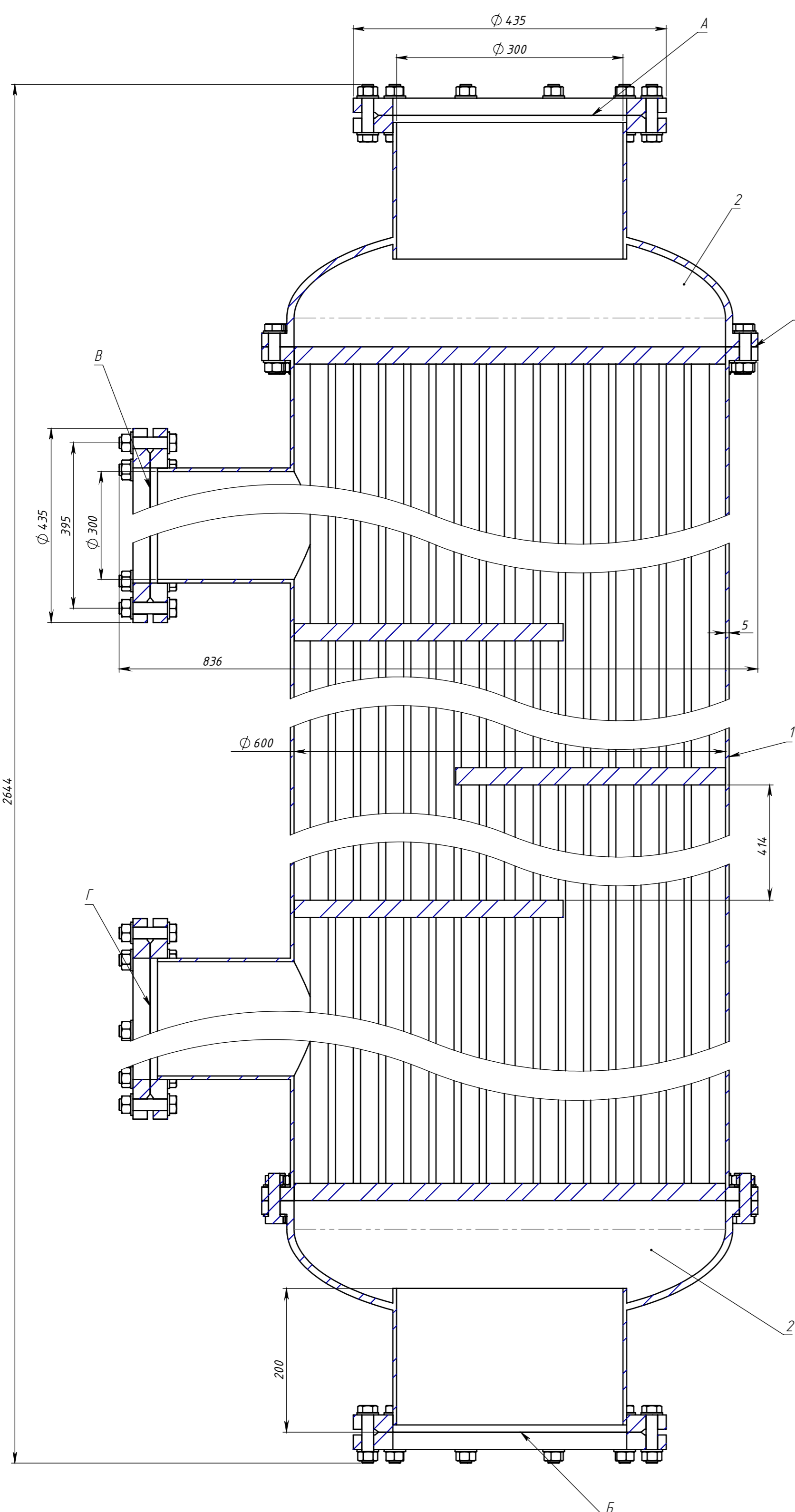
Змін. лист	№ доки	Тип	Дата
Розроб.	Мороз Д. А.		
Перев.	Степаненко Ж.		
Т. контр.			
Н. контр.	Мельник В.П.		

Лист	Маса	Масштаб
Лист 1		1:1

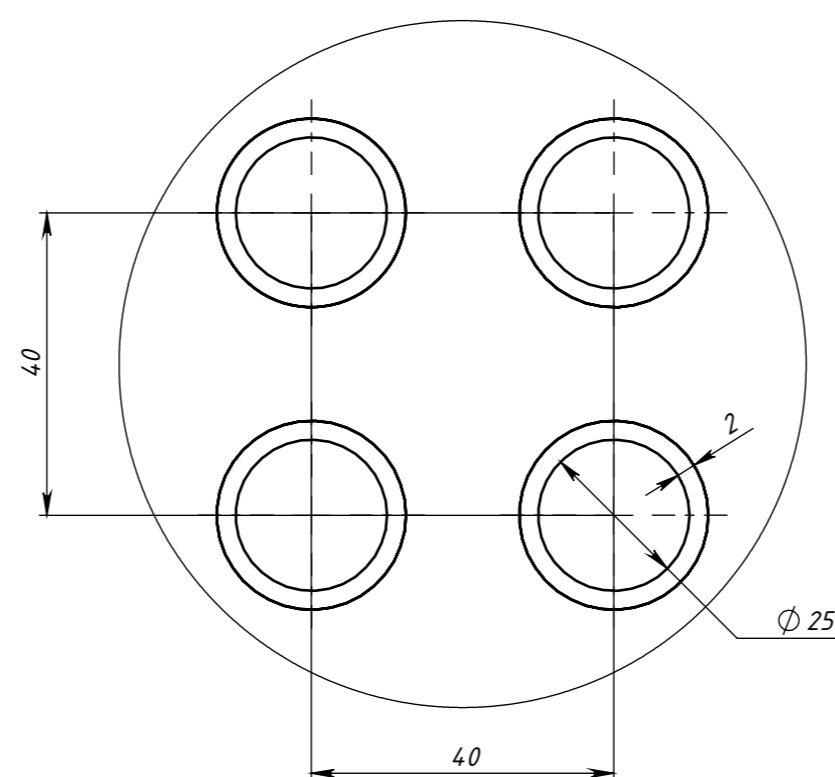
НТЗУ/КП, ФСТ, БІ-11



B-B (1 : 5)



C (1 : 1)



Позначення	Найменування	Кількість	Прохід умовний Ду, мм	Тиск умовний Р _у , МПа
A	Вхід ЛК	1	300	0,2
Б	Вихід ЛК	1	300	0,2
В	Вхід пари	1	300	0,2
Г	Вихід пари	1	300	0,2

Технічна характеристика

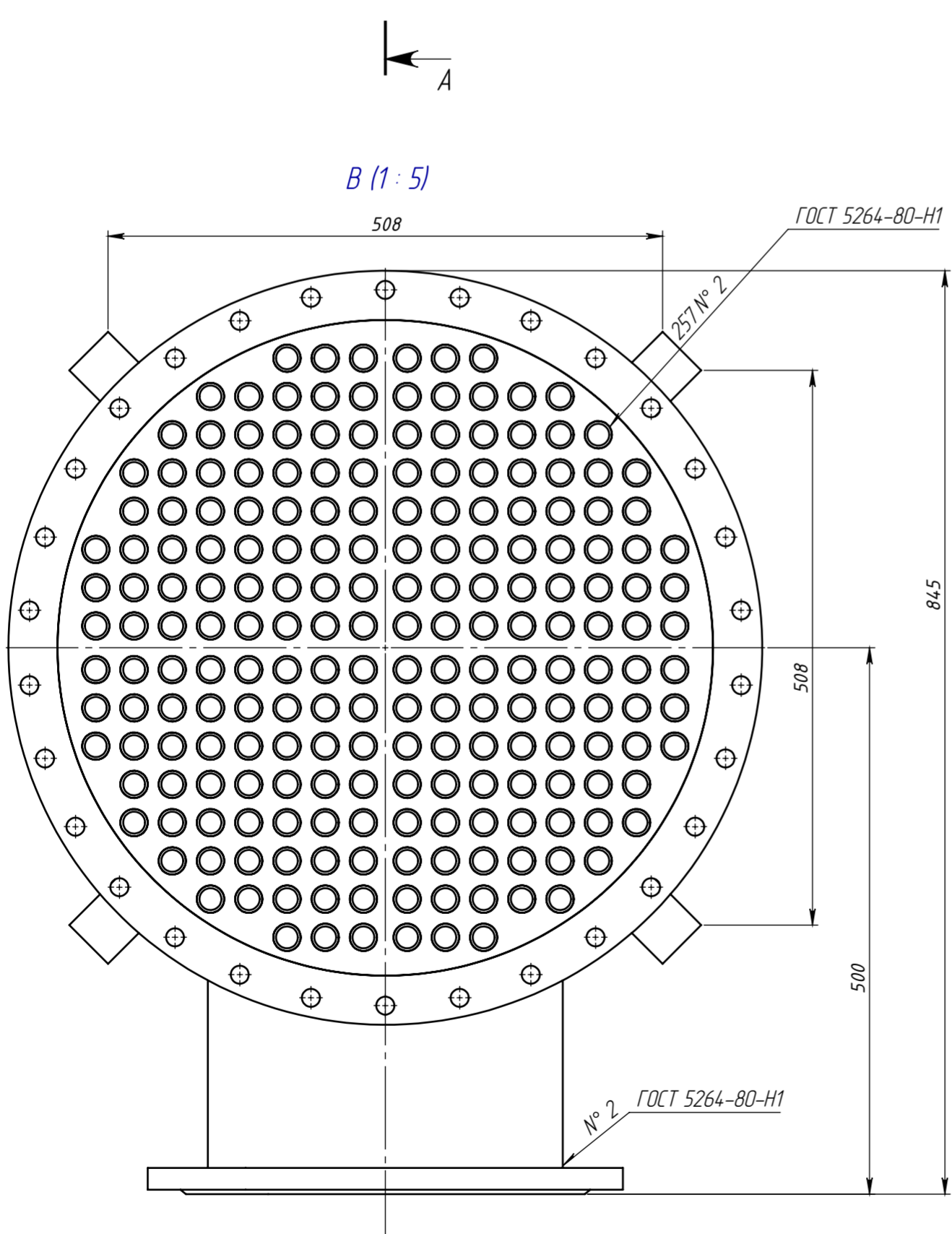
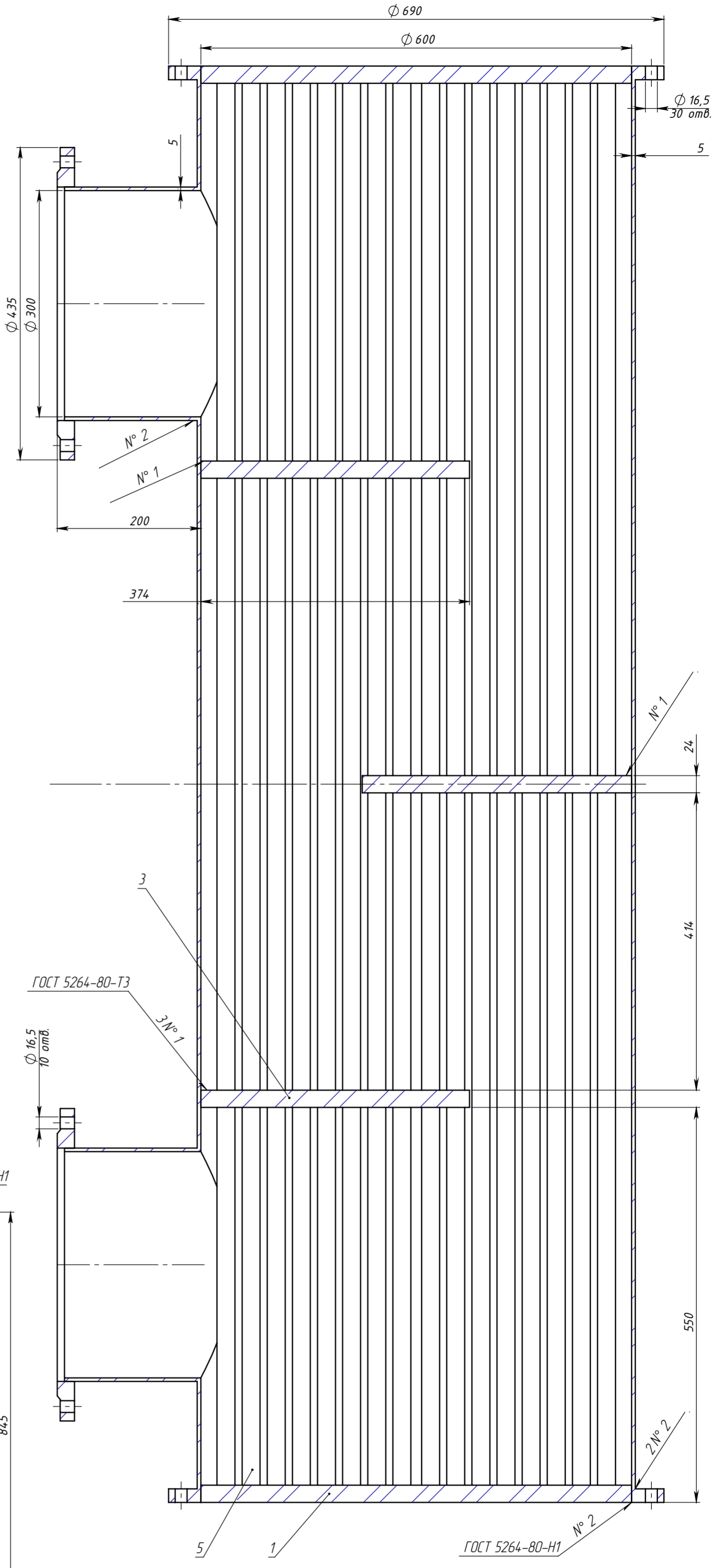
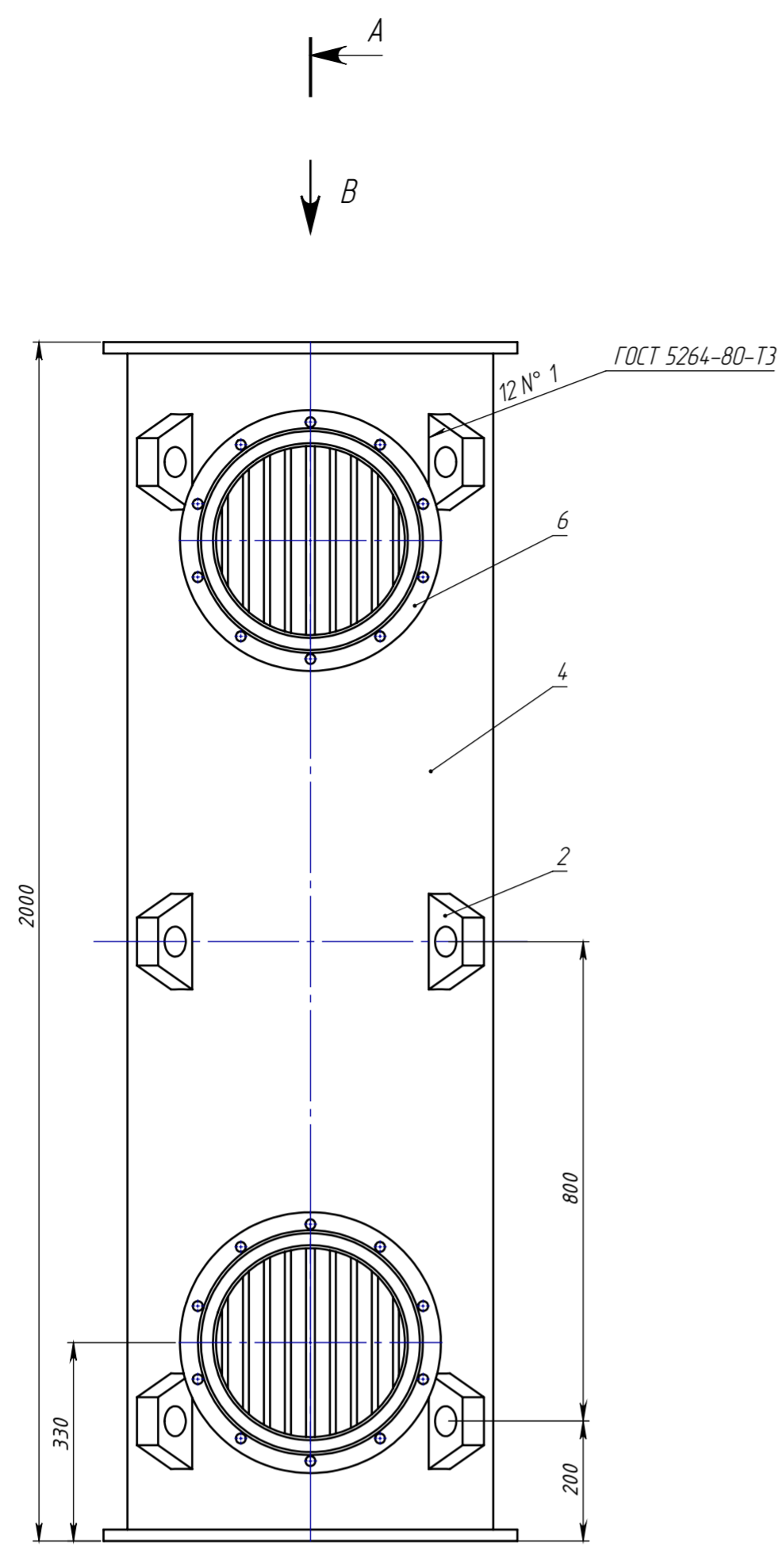
- Середовище в апараті:
 - У трудному просторі лимонна кислота (токсична, неагресивна);
 - У міжтрубному просторі пара (не токсична, неагресивна).
- Робоча температура, С:
 - Температура ЛК на вході в теплообмінник 19 С;
 - Температура ЛК на виході з теплообмінника 55 С.
- Витрати ЛК:
 - Об'ємна витрата 0,027 м³/с;
 - Масова витрата 103 т/год.
- Тиск в робочих умовах, 0,2 МПа.
- Контактна площа для теплообміну, 35 м².
- Розміри за крайніми точками, мм:
 - Висота 2644 мм;
 - Ширина 690 мм;
 - Довжина 836 мм.
- Діаметр і товщина труб, мм 25x2 мм.
- Загальна кількість труб, шт 257 шт.
- Маса теплообмінника, кг 1088 кг.

Технічні вимоги

- При виготовленні, випробуванні та доставці апарату повинні виконуватися наступні вимоги:
 - ГОСТ 12.2.003-74 "Оборудование производственное. Общие требования безопасности"
 - ГОСТ 26-291-79 "Сосуды и аппараты стальные сварные. Технические требования"
- Апарат випробувати на міцність і щільність гідравлічно
- Зварні з'єднання повинні відповідати вимогам ГОСТ 26-01-82-77 "Сварка в химическом машиностроении"
- Зварні шви в обсязі 100% контролювати рентгенопрощічуванням
- Креслення розроблено на основі ГОСТ 15 122-79

				Б1107.50231.000 СБ			
Эм. лист	№ докум.	Підп.	Дата	Кожухотрубний теплообмінник	Лит.	Маса	Масштаб
Розроб.	Мароз О.				1088кг	1:10	
Перев.	Остапенко Ж.І.			Аркуш 1	Аркуш 1	КПІ ім. І. Сікорського ФБТ, БІ-11	
Т. контр.				Формат А1			
Н. контр.							
Затв.	Мельник В.М.						

Лист	№ докум.	Підп.	Дата
Розроб.	Мароз О.		
Перев.	Остапенко Ж.І.		
Т. контр.			
Н. контр.			
Затв.	Мельник В.М.		

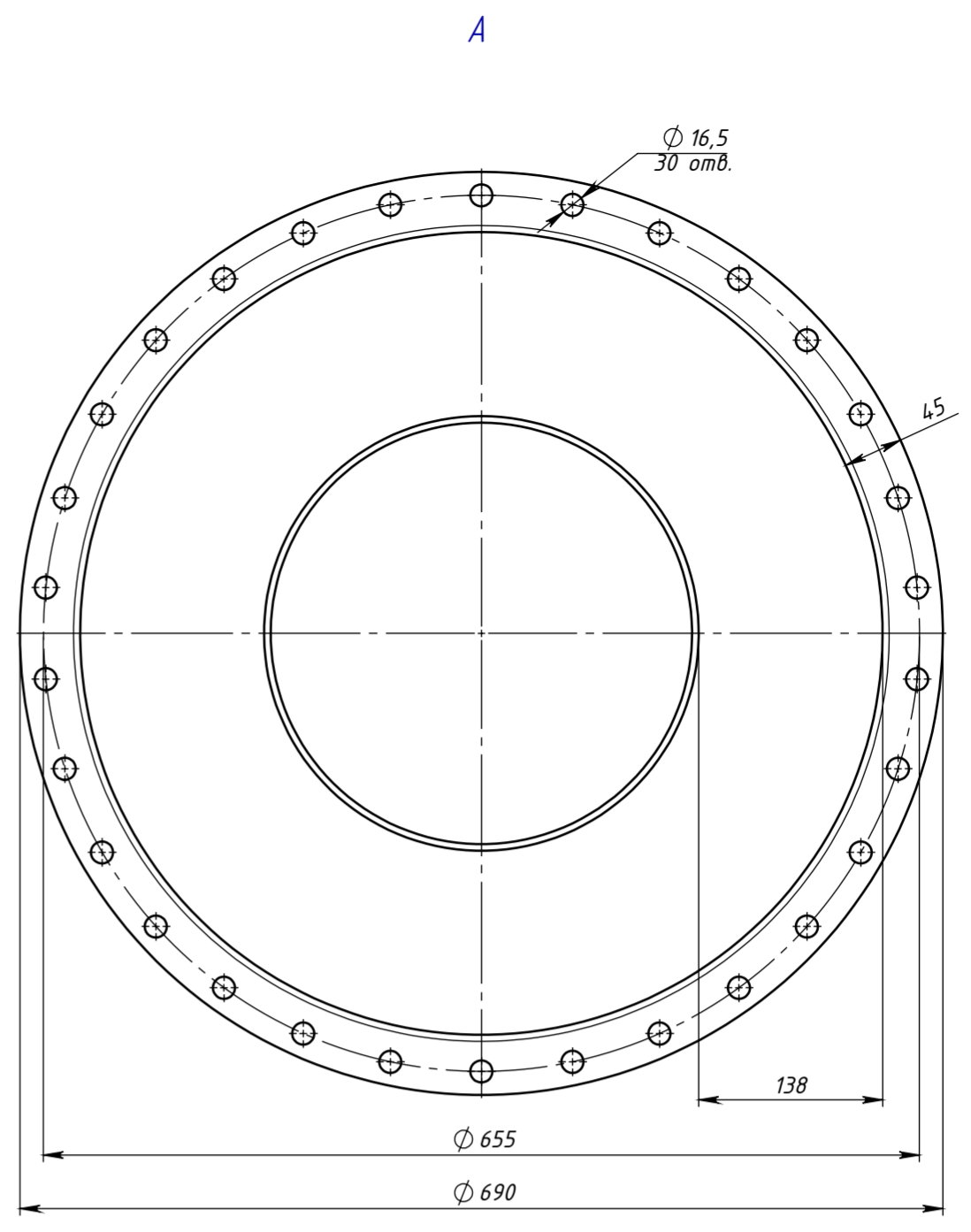
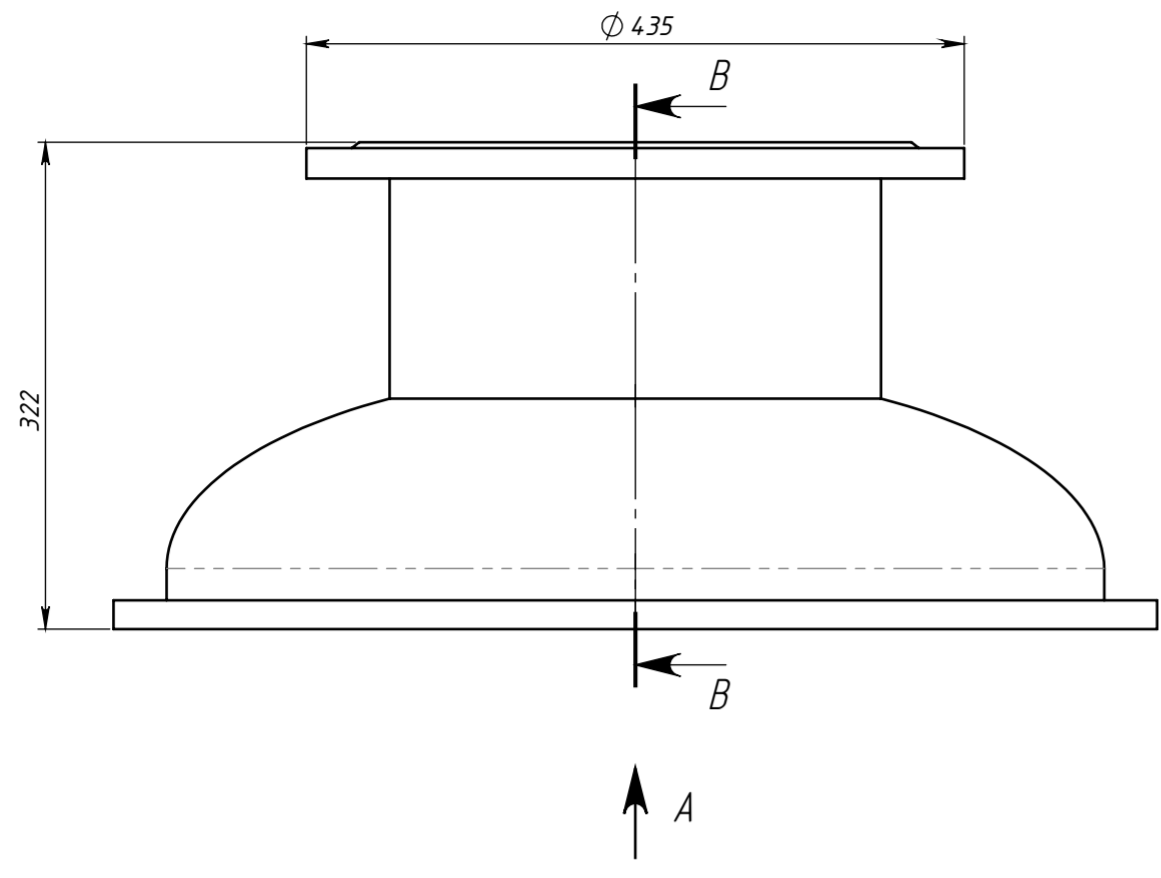


Таблиця зварних швів

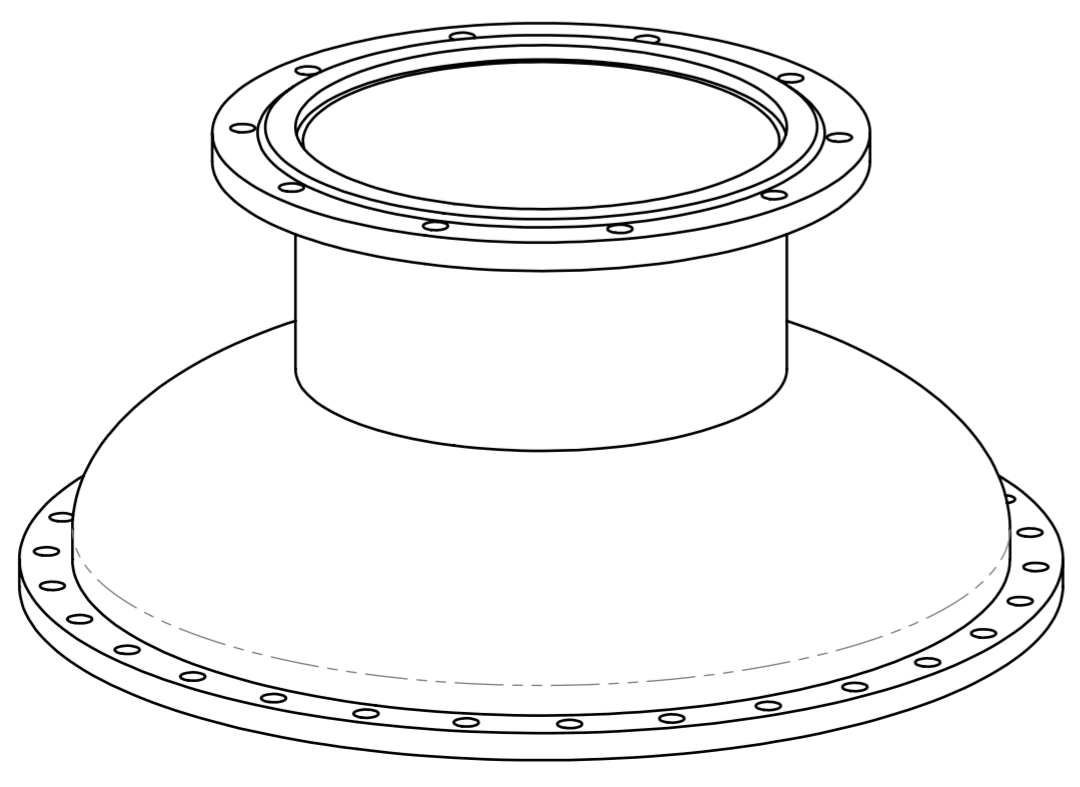
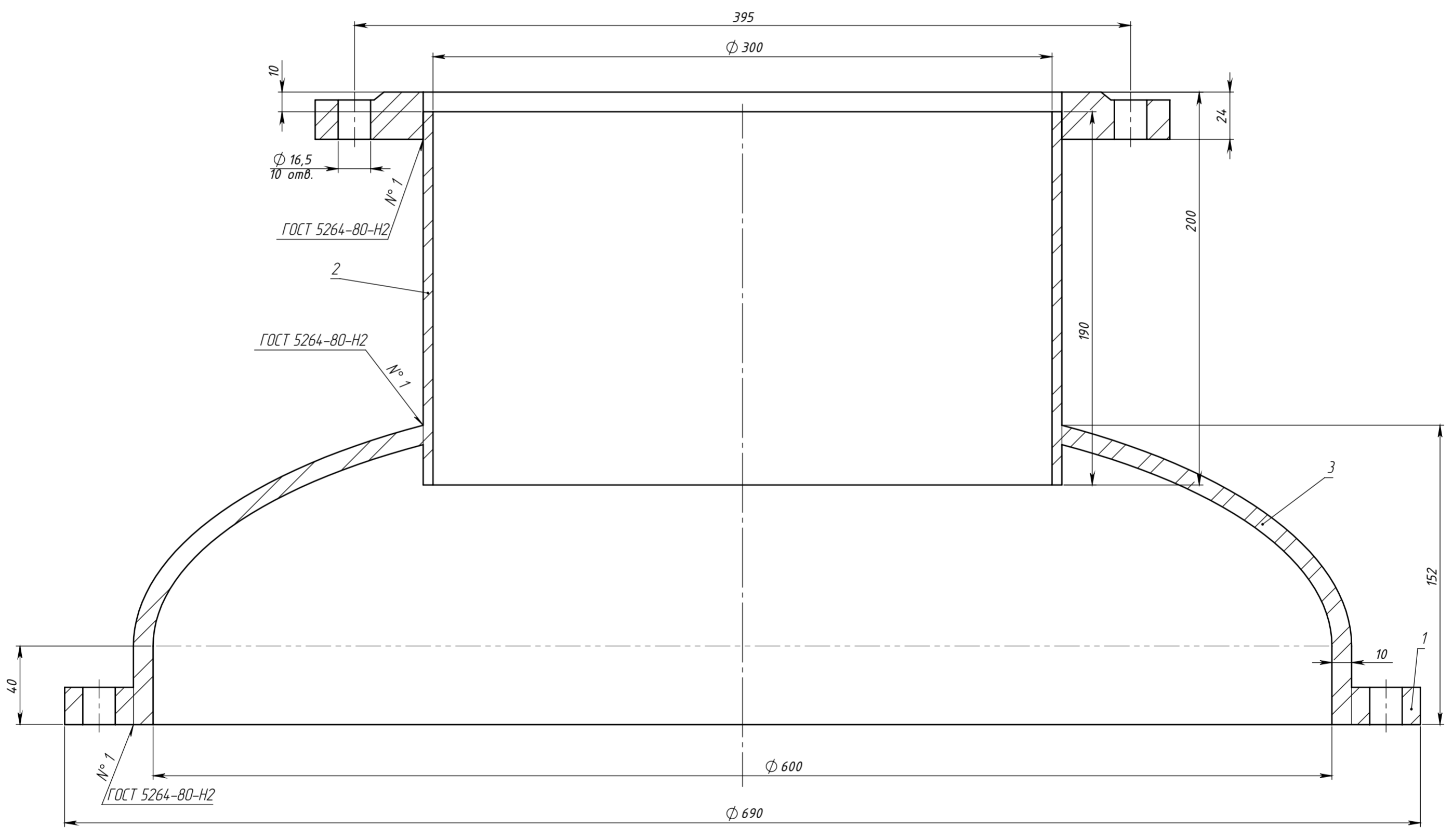
Номер шву	Найменування	Кількість	Примітки
№1	ГОСТ 5264-80-Т3	1	
№2	ГОСТ 5264-80-Н1	1	

Перв. примін.
Справ. №
Підп. і дата
Інв. № дубл.
Взам. інв. №
Підп. і дата
Інв. № подл.

БІ1107.50231.001 СБ					
Корпус			Літ.	Маса	Масштаб
Зм. Лист	№ докум.	Підп.	Дата		1:10
Розроб.	Мороз О. А.				
Перев.	Остапенко Ж.І.				
Т. контр.				Аркуш 1	Аркушів 1
Н. контр.				КПІ ім. І. Сікорського ФБТ, БІ-11	
Затв.	Мельник В.М.			Формат А2	



B-B (1 : 2)



Справ. №
Перш. примін.

Інв. № підл.
Інв. № дубл.
Взам. інв. №
Підп. і дата

Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата
Розроб.	Мороз О. А.			
Перев.	Остапенко Ж. І.			
Т. контр.				
Н. контр.				
Затв.	Мельник В. М.			

Б11107.50231.002 СБ		
Кришка		
Лім.	Маса	Масштаб
		1:5
Аркуш 1	Аркушів 1	
КПІ ім. І. Сікорського ФБТ, БІ-11		
Формат А2		