

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Факультет біотехнології і біотехніки

Кафедра біотехніки та інженерії

«На правах рукопису»
УДК _____

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

_____ В.М. Мельник

«__» _____ 20__р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

зі спеціальності 133 Галузеве машинобудування

**на тему: «Модернізація вакуум – випарного апарату, для
виробництва ітаконової кислоти»**

Виконав:

студент VI курсу, групи БІ-11мп

Дудук Євгеній Віталійович _____

Керівник:

кандидат.техн. наук, доцент.

Поводзинський В.М. _____

Консультант з розробки стартап-проекту:

д.б.н., професор

Дуган О.М. _____

Рецензент

д.т.н., с.н.с. _____

Авдєєва Леся Юріївна _____

Засвідчую, що у цій магістерській
дисертації немає запозичень з праць
інших авторів без відповідних
посилань.

Студент _____

Київ – 2022 року

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

Факультет біотехнології і біотехніки

Кафедра біотехніки та інженерії

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо-професійною програмою

Спеціальність (спеціалізація) – 133 «Галузеве машинобудування»
(«Обладнання фармацевтичних та біотехнологічних виробництв»)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

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

«__» _____ 20__р.

ЗАВДАННЯ

на магістерську дисертацію студенту

Дудуку Євгенію Віталійовичу

1. Тема дисертації: «Модернізація вакуум – випарного апарату, для виробництва ітаконової кислоти», науковий керівник дисертації Поводзинський Вадим Миколайович, затверджені наказом по університету від «__» _____ 20__р. №__
2. Термін подання студентом дисертації _____
3. Об'єкт дослідження: випарний апарат з виносною гріючою камерою
4. Предмет дослідження: процес випарювання, характеристики міцності і стійкості випарного апарату та окремих його конструктивних елементів.
5. Перелік завдань, які потрібно розробити: провести літературний аналіз за темою дисертації, дослідити стан проблеми; розглянути математичну модель процесу випарювання, провести чисельний експеримент на її основі; запропонувати оптимізаційну конструкцію випарного апарату; розробити конструкцію та 3D модель випарного апарату.
6. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу: Апаратурно-технологічна схема виділення та очистки ітаконової кислоти (А1); Випарний апарат з виносною гріючою камерою. Складальні креслення (А0); Корпус гріючої камери. Складальне креслення (А2); Кришка сепаратора. Складальне креслення (А2); Решітка трубна (А3); Труба вентиляційна (А3); Корпус бризкоуловлювача (А3); Кришка. Складальне креслення (А3); Плакати за темою магістерської дисертації.

7. Орієнтовний перелік публікацій: _____

8. Консультанти розділів дисертації

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розробка стартап - проекту	д.б.н., професор Дуган О. М.,		

9. Дата видачі завдання _____

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проекту	Строк виконання етапів проекту	Примітка
1	Літературний огляд; дослідження стану проблеми	03.09.2022-03.12.2022	
2	Теоретичні дослідження;	15.10.2022-12.11.2022	
3	Патентний пошук; розробка конструкції випарного апарату;	10.09.2022-15.10.2022	
4	Проведення комп'ютерного моделювання; оформлення результатів експерименту	12.11.2022-03.12.2022	
5	Практична реалізація; розроблення технічної документації на випарний апарат з виносною гріючою камерою	04.04.2022-30.04.2022	
6	Розробка стартап-проекту	05.11.2022-07.12.2022	
7	Оформлення пояснювальної записки, креслень та документації	10.09.2022-07.12.2022	

Студент

Дудук Є.В.

Науковий керівник дисертації

Поводзинський В.М

РЕФЕРАТ

УДК 66.048.911

Атестаційна робота освітньо-кваліфікаційного рівня «магістр» на тему:

«Модернізація вакуум-випарної установки для виробництва ітаконової кислоти» / НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського»; Керівник В.М. Поводзінський – К., 2018. – 151 с.: іл. – 34. Виконавець Дудук Є.В. – Бібліогр.: 28 с.

Робота складається зі списку позначень, вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаної літератури та додатків. Повний обсяг роботи 151 сторінок, 34 рисунки, 24 таблиці та список літератури 28 назв (на 3 сторінках).

Ітаконова кислота використовується в багатьох галузях промисловості. Найбільш широко використовується в хімічній промисловості та будівництві.

Найважливішою частиною теплової схеми виробництва ітаконової кислоти, де є необхідність концентрування розчинів, є випарна установка, призначена для згущення розчину.

Об'єктом дослідження є випарний апарат з виносною гріючою камерою з природною циркуляцією.

Предметом дослідження є процес випаровування, характеристики міцності та довговічності випарного апарату та його окремих конструктивних елементів.

Метою магістерської роботи є модернізація випарного апарату з виносною гріючою камерою та дослідження процесів випаровування.

Математичні та комп'ютерні дослідження показали, що запропонована конструкція ефективніша за аналоги і може бути використана при проектуванні нового обладнання.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ІТАКОНОВА КИСЛОТА, ВИПАРЮВАЛЬНИК, ВИПАРЮВАННЯ.

ANOTATION

Attestation work of the educational and qualification level "Master" on the theme:

"Modernization of the vacuum - evaporation apparatus for the production of itaconic acid" / NTUU "KPI named after Igor Sikorsky"; Head V.M. Povodzinsky - K., 2018. - 167 p.: illustrations. – 34. Performer Duduk Y.V. – Bibliography: 28p.

The work consists of a list of notations, an introduction, five chapters, conclusions, a list of references and appendices. The full volume of the work is 167 pages, 34 figures, 24 tables and a list of references from 28 names (on 3 pages).

Itaconic acid is used in many industries. It is most widely used in the chemical industry and the construction industry.

The most important part of the thermal scheme for the production of itaconic acid, where there is a need to concentrate solutions, is the evaporation unit designed to thicken the solution.

The object of the study is an evaporation apparatus with a remote heating chamber with natural circulation.

The subject of the study is the evaporation process, characteristics of the strength and durability of the evaporation apparatus and its individual structural elements.

The aim of the master's work is to modernize the evaporation apparatus with a portable heating chamber and to study evaporation processes.

Mathematical and computer studies have shown that the proposed design is more effective than analogues and can be used in the design of new equipment.

KEY WORDS: ITACONIC ACID, EVAPORATOR, EVAPORATION.

ЗМІСТ

Перелік умовних позначень, скорочень і термінів	9
ВСТУП.....	12
1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ	14
1.1 Призначення та область застосування апарату.....	14
1.2. Опис технологічного процесу концентрування ітаконової кислоти	19
1.3. Опис технологічної схеми виробництва ітаконової кислоти.....	22
1.4 Огляд конструкцій випарних апаратів	23
1.5 Патентне дослідження випарних апаратів	35
1.6 Висновки	40
1.7 Постановка задач дослідження	40
2 МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ ВИПАРЮВАННЯ	41
2.1 Просте випарювання	41
2.2 Моделювання процесів випарювання	43
2.3 Модель технологічного розрахунку режимів випарювання	46
2.4 Висновки	52
3. КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВИПАРНОГО АПАРАТУ З ВИНОСНОЮ ГРІЮЧОЮ КАМЕРОЮ.....	53
3.1 Порівняльний аналіз труб різної геометрії в гріючій камері	53
3.2 Висновки	57
3.3 Основи методу скінчених елементів	57
3.4 Побудова 3D моделі та конструктивний розрахунок	59
3.5 Висновки	69
4. ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ РОЗРОБЛЕНОЇ КОНСТРУКЦІЇ.....	70
4.1 Обґрунтування вибору конструкції випарного апарату Концентрування	

розчину ітаконової кислоти, отриманої глибинним.....	70
4.1.1 Опис конструкції випарного апарату	70
4.1.2 Вибір матеріалів для виготовлення випарного апарату	71
4.2 Технічна характеристика випарного апарату.....	73
4.3 Розрахунки, що підтверджують працездатність та надійність конструкції випарного апарату	74
4.3.1 Технологічний розрахунок випарного апарату	74
4.3.2 Гідравлічний розрахунок випарного апарату	83
4.3.3 Розрахунок барометричного конденсатора	84
4.3.4 Розрахунок штуцерів випарного апарату	88
4.3.5 Розрахунок товщини стінки деталей випарного апарату.....	91
4.3.5.1 Розрахунок товщини стінки деталей гріючої камери.....	92
4.4.5.1.1 Розрахунок товщини стінки корпусу гріючої камери	92
4.4.5.1.2 Розрахунок товщини стінки днища гріючої камери Розрахункова схема еліптичного днища, що знаходиться під дією	93
4.4.5.1.3 Розрахунок товщини стінки царги гріючої камери	94
4.4.5.1.4 Розрахунок товщини стінки кришки гріючої камери.....	96
4.3.5.2 Розрахунок товщини стінки деталей сепаратора.....	98
4.4.5.2.1 Розрахунок товщини стінки верхньої царги сепаратора Розрахункову товщину стінки верхньої царги сепаратора (див. рисунок	98
4.4.5.2.2 Розрахунок товщини стінки нижньої царги сепаратора Розрахункову товщину стінки нижньої царги сепаратора (див. рисунок.....	99
4.4.5.2.4 Розрахунок товщини стінки кришки сепаратора Розрахункову товщину стінки кришки сепаратора (див. рисунок 17)	103
4.4.5.3 Розрахунок товщини стінки циркуляційної труби.....	104
4.3.6 Розрахунок трубної решітки.....	105

4.3.7 Розрахунок фланцевих з'єднань випарного апарату	108
4.3.7.1 Розрахунок фланцевого з'єднання грійучої камери	111
4.3.7.2 Розрахунок фланцевого з'єднання сепаратора	116
4.3.7.3 Розрахунок фланцевого з'єднання циркуляційної труби	121
4.3.8 Перевірка несучої спроможності обичайки випарного апарату під дією .. опорних навантажень	127
4.3.8.1 Перевірка несучої спроможності обичайки грійучої камери під дією опорних навантажень	127
4.3.8.2 Перевірка несучої спроможності обичайки сепаратора під дією опорних навантажень	130
4.5 Рекомендації з ремонту, монтажу та експлуатації апаратів в установці	132
4.6 Висновки	135
5. РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЕКТУ	137
5.1 Резюме	137
5.2 Фінансові складові проєкту	141
5.3 Шляхи монетизації проєкту	87
5.4 Висновки	89
ВИСНОВКИ	90
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	91

Перелік умовних позначень, скорочень і термінів

Р–реактор;

ВФС–стрічковий вакуум-фільтр

АП–випарний апарат;

БрК–барометричний конденсатор;

ФПр–рамний пресфільтр;

ЗГ–затвір гідравлічний;

ВК–вакуум насос

Цф–центрифуга;

Тр–транспортер

Зб–збірник;

ТК– теплообмінник;

Кр–кристалізатор;

Н–насос;

СБ–сушарка барабанна;

Ф–фільтр;

G – масова витрата, $кг/с$;

c – теплоємність, $Дж/кг \cdot ^\circ C$;

ρ - густина, $кг/м^3$;

λ – коефіцієнт теплопровідності, $Вт/м \cdot ^\circ C$;

μ – коефіцієнт динамічної в'язкості, $Па \cdot с$;

ν – коефіцієнт кінетичної в'язкості, $м^2/с$;

V – об'ємна витрата, $м^3/с$;

k – коефіцієнт теплопередачі, $Вт/м^2 \cdot K$;

α – коефіцієнт тепловіддачі, $Вт/м^2 \cdot K$;

δ – товщина стінки труби, $м$;

r – термічний опір забруднень, $Вт/м^2 \cdot K$;

$d_{екв}$ – еквівалентний діаметр, $м$;

D_e – внутрішній діаметр кожухової труби, м;
 Re – критерій Рейнольдса;
 Nu – критерій Нусельта;
 Pr – критерій Прандтля;
 Q – поверхнева густина теплового потоку, $Вт/м^2$;
 Δp – перепад тиску в апараті, Па;
 η – коефіцієнт корисної дії;
 l – довжина труби, м;
 ξ – коефіцієнт місцевого опору;
 ω – швидкість руху рідини, м/с;
 N – потужність привода насоса, Вт;
 n_y – границя стійкості;
 φ – коефіцієнт міцності зварних швів;
 D_n – зовнішній діаметр фланця, м;
 D_o – діаметр болтової окружності, м;
 d_o – діаметр болта, м;
 l_o – довжина болта, м;
 u_1 – нормативний зазор, м;
 k_{np} – прокладочний коефіцієнт;
 a – конструктивний додаток до розміру болтів, м;
 h_n – товщина прокладки, м;
 b – ширина прокладки, м;
 k_n – коефіцієнт обтискання прокладки;
 E – модуль пружності, МПа;
 f_o – площа поперечного перерізу болта, $м^2$;
 ν, ψ_1, ψ_2 – конструктивні коефіцієнти;
 α_ϕ – коефіцієнт об'ємного розширення фланця, $^{\circ}C^{-1}$;

α_{δ} – коефіцієнт об'ємного розширення болтів, $^{\circ}C^{-1}$;

α_c – коефіцієнт об'ємного розширення вільного кільця, $^{\circ}C^{-1}$;

q – зусилля герметизації, $МПа$;

$[\sigma]$ – граничне напруження, $МПа$;

$[P]$ – допустимий тиск, $МПа$;

y_{ϕ} – піддатливість фланця, $1/(м \cdot МН)$;

y_{δ} – піддатливість болтів, $м/МН$;

y_c – піддатливість вільного кільця, $1/(м \cdot МН)$;

$[\theta]$ – граничний кут повороту, $рад$;

l_R – розрахункова довжина патрубків, $м$;

G'_c – маса однієї секції заповнена рідиною, $кг$;

$m_{зов}$ – маса зовнішніх кожухових труб, $кг$;

$m_{вн}$ – маса внутрішніх теплообмінних труб, $кг$;

m_{ϵ} – маса соку в секції, $кг$;

m_p – маса водяної пари в секції, $кг$;

$M_{\max}$ – максимальний момент, що виникає в опорі, $Н \cdot м^2$;

W – момент опору, $м^3$.

ВСТУП

Біотехнологія — міждисциплінарна галузь, що виникла на стику біологічних, хімічних і технічних наук. З розвитком біотехнології пов'язують вирішення глобальних проблем людства — ліквідацію нестачі продовольства, енергії, мінеральних ресурсів, поліпшення стану охорони здоров'я і якості навколишнього середовища. У наш час дуже стрімко розвивається біотехнологія і актуальним є саме розробка та вдосконалення біотехнологічних процесів, а разом з тим і технічного та апаратурного оснащення.

Максимально точний розрахунок процесів та апаратів дає можливість максимізувати масштаби отриманої продукції в таких галузях промисловості як: біотехнологічна, фармацевтична, харчова, мікробіологічна та ін. Виробництво готової продукції являється складним та багатостадійним процесом, що включає велику кількість різноманітних процесів: очищення, змішування, концентрування, нагрівання, охолодження, сушіння, стерилізацію [1].

Аналізуючи сучасний стан виробництва, можна сказати, що останнім часом застосування ферментерів в біотехнологічному виробництві набуло широкого застосування.

Апаратурне оформлення технологічних процесів біотехнологічних виробництв має велике значення для проектування технології. Обладнання має багато спільного з обладнанням хімічної та харчової промисловості [3].

Однак, процеси, що протікають в мікробіологічній апаратурі, відрізняються підвищеною складністю. Це обумовлено не тільки тим, що в біохімічному синтезі беруть участь живі організми, реакція яких на зміну навколишнього середовища часто непередбачувана. Складні по фізичній структурі самі системи, які обробляються на різних стадіях отримання біомаси. Частіше всього ці системи неоднорідні, що ускладнює аналіз процесів, що протікають у цих системах [4].

Процеси біотехнологічної промисловості проводять в умовах вузького

інтервалу температур, тиску, рН, не допускаючи значної зміни цих величин, які можуть привести до втрати цільового продукту.

Одна із вимог до обладнання біотехнологічних процесів – герметичність на стадіях підготовки поживного середовища, отримання посівного матеріалу та культивування. Важливим є також вибір матеріалів устаткування. Останні мають бути кислотостійкими, антикорозійними і не повинні інгібувати процесів, що проходять у апаратах [3].

У даному магістерському проекті розглядається модернізація вакуум випарного апарату для концентрування ітаконової кислоти

Актуальність даної теми визначається тим, що лінія виробництва ітаконової кислоти є економічно ефективною, а вакуум випарний апарат має високу продуктивність, що дозволяє економити енергоресурси.

1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

1.1 Призначення та область застосування апарату

Випарна установка є важливим елементом обладнання багатьох підприємств хімічної, харчової та інших галузей промисловості. Випарювання застосовують на заводах мінеральних солей, азотних добрив, содових, хлорних, цукрових, крохмале-патокових заводах, в алюмінієвій, целюлозно-паперовій промисловості і у виробництві полімерних матеріалів. В хімічній промисловості випарюванню підлягають розчини твердих речовин (розчини лугів, солей), а також розчини висококиплячих рідин, що при температурі випарювання мають дуже малий тиск пари, тобто є майже нелетючими (до них належать деякі мінеральні та органічні кислоти (серед яких є ітаконова кислота), багатоатомні спирти, тощо)[3].

Випарюванням в промисловості називають процес концентрування рідких розчинів майже не летючих речовин шляхом часткового видалення розчинника випарюванням при кипінні рідини. В процесі випарювання розчинник видаляється з усього об'єму розчину, в той час як при температурах нижче температур кипіння випарювання відбувається тільки з поверхні рідини.

Тепло для випарювання можна підводити будь-якими теплоносіями, що використовуються при нагріванні. Найчастіше використовують воду за дешевизну та велику теплоємність.

Тепло, необхідне для випарювання, підводиться через стінку, що відділяє розчин від теплоносія. Іноді тепло передається тепловіддачею безпосередньо від теплоносія до розчину що випарюють. Процеси випарювання проводять під вакуумом, при підвищеному тиску та атмосферному тиску. Вибір тиску залежить від властивостей випарюваного розчину та можливості використання вторинного тепла.

Випарювання під вакуумом має ряд переваг перед випарюванням при атмосферному тиску, незважаючи на те, що теплота випарювання розчину

дещо збільшується зі зниженням тиску через що збільшується витрата пари на випарювання одиниці розчинника (на 1 кг води). Перевагами такого випарювання є можливість проведення процесу при нижчих температурах, що важливо при випарюванні розчинів речовин, що здатні розкладатись при високих температурах (ітаконова кислота розкладається при 175 °C). Крім того при розрідженні збільшується корисна різниця температур між гріючим агентом та розчином, що дозволяє зменшити поверхню нагріву.

Використання вакууму дає можливість використовувати в якості гріючого агенту також вторинну пару самої установки, що знижує затрати на нагрів додаткової кількості теплоносія. Проте використання вакуума підвищує затрати виробництва на створення вакууму та експлуатацію апарату.

Різновиди вакуум-випарних установок.

В залежності від методу компресії виробляємої пари:

- з механічною компресією пари (MVR)
- з тепловою компресією пари (TVR)
- з об'єднанням механічної і теплової компресій.

Для механічної компресії пари необхідний компресор або нагнітач повітря, щоб стискати пар; теплова компресія пари використовує парові очисники.

Установки з механічною компресією використовують електроенергію, але майже не споживають пар, не рахуючи той, який необхідний для запуску обладнання, що дозволяє збільшувати виробничі заощадження.

Вакуум-випарні установки з тепловою компресією використовують готовий пар.

Для більш повного використання теплоти вторинної пари, що утворюється в вакуум-апараті, установки комплектують тепловим насосом.

На однокорпусні установки або на перший корпус багатокорпусних установок встановлюють парострумінний інжектор. Основним параметром, що характеризує ефективність роботи інжектора, є коефіцієнт інжекції. Він показує, яку кількість вторинної пари може бути стиснуто в інжекторі до необхідних параметрів 1 кг гріючої пари.

Ознаки класифікації вакуум-апаратів:

- за принципом дії (періодичні і безперервні);
- за формою і розташуванню поверхні нагрівання (похилі, вертикальні);
- по використанню тепла вторинних парів (з використанням і без використання);
- по числу корпусів (одно-, двох- і багатокорпусні);
- по руху згущуємої рідини (циркуляційні, з падаючою або піднімаючою плівкою).

Переваги випарювання у вакуум-апаратах в порівнянні з випарюванням при атмосферному тиску:

- Випарювання у вакуумі при температурі кипіння близько 60°C рідин, кипіння яких при атмосферному тиску має температуру кипіння 100°C і супроводжується фізико-хімічними змінами з втратою біологічної цінності продукту.
- Зменшення втрат тепла в навколишнє середовище, і як наслідок - витрат гріючої пари.
- Можливість використання вторинної пари, що призводить до економії тепла, зменшенню витрат гострої пари.

- Менший час згущення і більше знімання продукту з 1 кг площі нагріву, - завдяки більшому перепаду температур між теплоносієм і рідиною, що випарюється.

Методи випарювання.

Випарювання проводять у випарних установках різних конструкцій. Теплоносієм зазвичай служить насичений водяний пар. Залежно від умов випарювання застосовуються поодинокі випарні апарати і багатокорпусні випарні установки (БВУ) складені з декількох одиночних випарників (корпусів).

За методом ведення процесу розрізняють періодичне і безперервне випаровування. При періодичному випаровуванні розчин надходить в один апарат і згущується до заданої концентрації, або в міру випаровування безперервно або періодично вводиться свіжий розчин до тих пір, поки уварювалася маса заповнить весь апарат. Згущений розчин випускають, а апарат заповнюється новою порцією свіжого розчину. Безперервний процес випарювання здійснюється в одиночних апаратах безперервної дії або в багатокорпусних випарних установках. Тут спостерігається сталий в часі процес: гріючий пар і рідкий розчин надходять безперервно; при цьому видаляється постійне кількість концентрованого розчину, безперервно відводиться гарячий конденсат пари, що гріє і вторинний пар.

Надходження розчину в випарну установку може здійснюватися за трьома схемами: прямоточною, противоточною і паралельного харчування. При прямоточному харчуванні розчин надходить в перший корпус і самопливом переходить в наступні корпусу за рахунок різниці тисків. При переході розчину з попереднього корпусу в наступний в область меншого тиску і менших температур, частина води з цього розчину випаровується за рахунок надлишкової теплоти міститься в розчині.

При противоточному харчуванні схема руху пара зберігається, але розчин надходить в останній корпус і в концентрованому вигляді виходить

з 4 першого. Внаслідок того, що тиск від останнього корпусу до першого поступово зростає, для перекачування розчину встановлюють відцентрові насоси. Протиточні установки використовують в основному для випарювання розчинів, в'язкість яких різко зростає зі збільшенням зі збільшенням концентрації, а також, якщо можливо випадання твердої речовини з розчину в останньому корпусі.

При паралельному живленні розчин надходить в усі корпусу одночасно і з них відбирається; по гріючій пару зберігається послідовне з'єднання корпусів. Цей метод застосовується при випаровуванні розчину, з якого видаляється невелика кількість розчинника.

Випарювання із застосуванням теплового насоса засновано на використанні вторинної пари в якості що гріє, а тому ж випарної апараті. Для цього температура вторинної пари повинна бути підвищена до температури пари, що гріє. Підвищення температури вторинної пари досягається стисканням його в компресорі або паровому інжекторі. В якості компресора зазвичай використовується турбокомпресор.

1.2. Опис технологічного процесу концентрування ітаконової кислоти

Ітаконовая кислота $C_5H_6O_4$ є ненасиченою двоосновною кислотою. Наявність у молекулі двох карбоксильних груп й активної метиленової групи визначає високу активність полімеризації ітаконової кислоти й участь у різних реакціях приєднання.

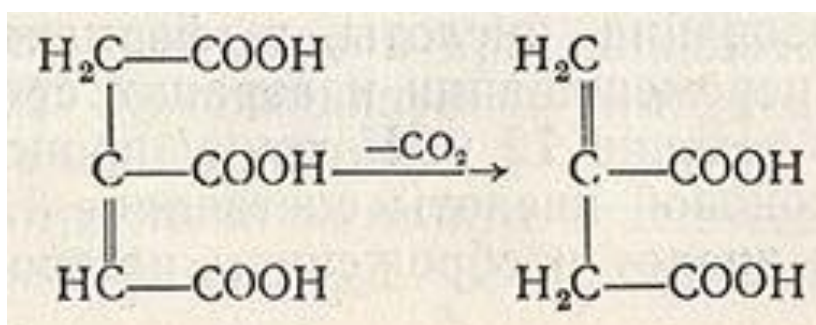
Ітаконова кислота являє собою білий кристалічний порошок, добре розчинний у воді й деяких органічних розчинниках, має молекулярну масу 130,1, щільність 1,63 і температуру плавлення 167- 168 °С.

Застосовується як полімер для карбоксилатних каучуків. Ітаконова кислота бере участь в реакціях полімеризації, утворюючи полімери з вільними карбоксильними групами. Ітаконова кислота використовується для отримання піролідон, бутіролактон, метілбутандіола, детергентів, гербіцидів, стирен-бутадієновий полімерів, нітрільних латексів, розчинників.

Виробництво ітаконової кислоти включає наступні основні технологічні стадії: одержання посівного матеріалу, культивування продуцента глибинним способом, виділення ітаконової кислоти.

Біосинтез ітаконовою кислоти пов'язаний з реакціями циклу Кребса. При декарбоксилюванні вихідного продукту-цис-аконітова кислота - утворюється ітаконовою кислота. Під час реакції в вуглецевому кістяку відбувається переміщення електронів, в результаті подвійний зв'язок переходить з положення 2,3 в положення 3,4

Цикл Кребса



Одержання посівного матеріалу.

Для виробництва ітаконової кислоти поверхневим і глибинним способами використовують відселекціоновані види *Asp. terreus* й *Asp. itaconicus*. Посівний матеріал розмножується в пробірках з агаризованим середовищем (сусло-агар), а потім у колбах на рідкому поживному середовищі. Тривалість кожної стадії 2-6 доб, оптимальна температура культивування 30-32 °С.

Культивування *Asp. terreus* глибинним способом.

При одержанні ітаконової кислоти глибинним способом культивування продуцента для підращування міцелію й на стадії виробничої ферментації може бути використане середовище однакового складу, але з різною концентрацією компонентів.

Поживне середовище для підрощування міцелію доцільно засівати попередньо (за 10-12 год) замоченими в середовищі конідіями з розрахунку 0,75 г конідій на 1 м3 середовища.

Біосинтез ітаконової кислоти протікає найбільше інтенсивно при засіві виробничого ферментатора культурою, що перебуває на прикінці логарифмічної фази росту, що відповідає приблизно 30 год росту.

Процес утворення кислоти у ферментаторі протікає при постійному перемішуванні й аерації середовища при температурі 33- 36°С протягом 72 год. До кінця процесу ферментації вміст ітаконової кислоти становить 37-38 г/л при загальному вмісті кислот у збродженому розчині 38,5-39,0 г/л.

В умовах поверхневого способу збродження розчину сахарози (шар 12 см) культурою *Asp. terreus* за 10-12 діб утвориться 56-58 % ітаконової кислоти в перерахуванні на цукор, причому ітаконова кислота 50 становить 94-97 % від суми всіх кислот, що утворилися (фумарової, щавлевої, янтарної).

У зброджених розчинах в середньому міститься від 3 до 6% ітаконовою кислоти, 0,5-1,5% незброджених цукрів, 0,3-0,6% інших органічних кислот і невелика кількість різних солей і фарбувальних речовин.

Виділення ітаконової кислоти.

Киплячий зброджений розчин, звільнений від грибного міцелію, обробляють активним вугіллям (0,3- 0,5%) і фільтрують. Фільтрат упарюють при температурі 50-60 °С до 1/4- 51 1/10 первісного обсягу. Упарений розчин подається в кристалізатор, де охолоджується до 13-15°С. Кристалізується ітаконова кислота 75- 80 % від її змісту в розчині.

Технічна ітаконова кислота відокремлюється на центрифугу. Вона містить 3-6 % вологи, 1-3 % інших органічних кислот й 2-5 % різних домішок. Для очищення технічну ітаконову кислоту розчиняють у гарячій воді до 25 %-вої концентрації й освітлюють активованим вугіллям (5-8 % по масі кислоти). Гарячий розчин фільтрують, а потім кристалізують. У процесі центрифугування кристали кислоти промивають дистильованою водою.

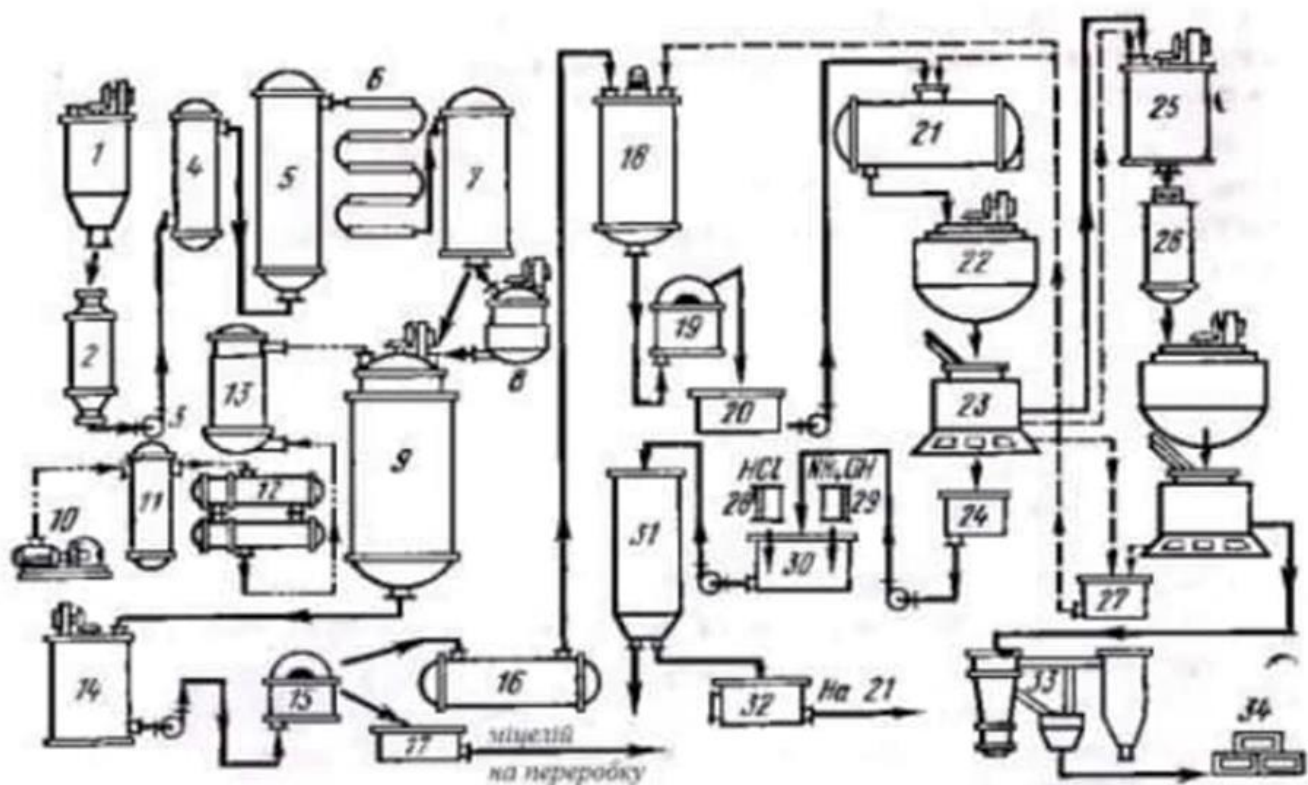
Маточний розчин після перекристалізації упарюють до 30-40 % первісного обсягу й кристалізують удруге. Із цією метою гарячий розчин знову фільтрують і концентрують. Концентрат повільно охолоджують, а потім центрифугують. Кристали ітаконової кислоти, що випали, промивають дистильованою водою, сушать. Третя стадія очищення передбачає спільну обробку маточних і зброджених розчинів у зазначеній послідовності.

При підвищеному вмісті залишкових цукрів й інших домішок у зброджених розчинах рекомендується проводити виділення ітаконової кислоти за допомогою іонообмінних смол. Регенерація відпрацьованого іоніта здійснюється соляною кислотою, а перевод в основну форму - розчином аміаку.

Киплячий зброджений розчин, звільнений від грибного міцелію, обробляють активним вугіллям і фільтрують. Упарений розчин подається в кристалізатор, де охолоджується. Технічна ітаконова кислота відокремлюється на центрифугі. Для очищення технічну ітаконову кислоту розчиняють у гарячій воді й освітлюють активованим вугіллям.

1.3. Опис технологічної схеми виробництва ітаконової кислоти

Технологічна схема одержання ітаконової кислоти глибинним способом представлена на рисунку.



1 - змішувач; 2- сітчастий фільтр; 3 - відцентровий насос; 4- стерилізаційна колона; 5 - витримувач; 6 - охолоджувач; 7- збірник; 8 - ферментатор для підрощування; 9 - ферментатор виробничий; 10 - компресор; 11 - ресивер; 12 - холодильник; 13-фільтр; 14 - збірник; 15 - барабанний вакуум-фільтр; 16 – збірник монтежу; 17 - збірник міцелію; 18 – збірник-освітлювач; 19-барабанний вакуумфільтр; 20 - збірник розчинів;

21 - вакуум-апарат; 22 - кристалізатор; 23 - центрифуга; 24 - збірник фільтрату; 25 - розчинник кристалів; 26 - друк- фільтр; 27- збірник маточних розчинів; 28 - мірник соляної кислоти; 29 - мірник розчину аміаку; 30 - реактор для розведення; 31 - аніонітовий фільтр; 32-збірник розчинів; 33 - сушарка; 34 - готова продукція.

1.4 Огляд конструкцій випарних апаратів

Випарний апарат повинен відповідати ряду вимог: бути простим, компактним, надійним в експлуатації; мають високу продуктивність; вищий поверхневий натяг нагріву та високі коефіцієнти теплопередачі можуть бути дозволені за мінімальної ваги та вартості.

Різноманітність конструкцій випарників ускладнює їх класифікацію. Так, випарники можна розділити в залежності від:

- від розташування і виду поверхні нагріву;
- конфігурації поверхні нагріву;
- компоновки поверхні нагріву;
- роду теплоносія;
- взаємного розташування робочих середовищ;
- кратності і режиму циркуляції.

По методу випаровування випарні установки бувають

- поверхневого типу, в яких розчин контактує з поверхнею теплообміну;
- контактного типу, в яких нагрівання здійснюється без розділяючої поверхні теплообміну;
- адіабатного випаровування.

Розглянемо найпоширеніші в промисловості конструкції випарних апаратів.

1) Випарний апарат з центральною циркуляційною трубою (рис. 1.1) має нагрівальну камеру, що складається з корпусу 1 з кип'ятильними

трубками 2 і центральною циркуляційною трубою 3 великого діаметру, закріпленими в трубних решітках. Нагрівальна пара подається в міжтрубний простір, конденсується і видаляється з приладу у вигляді конденсату. Вихідний пароподібний розчин безперервно подається зверху, а пароподібний розчин безперервно видаляється через штуцер, розташований у нижній частині апарата, або через ліхтар 7, призначений для підтримки постійного рівня розчину в апараті.

У ній за допомогою патрубка 6 підтримується такий же тиск, як і в сепараторі 5. Пароутворення всередині центральної труби значно менше, ніж у киплячих трубах, оскільки поверхня теплопередачі менша на одиницю об'єму рідини в ній. .

В результаті щільність парорідинної емульсії (майже рідини) в центральній трубі більша, ніж у киплячих трубах. Це зумовлює природну циркуляцію розчину: гідростатичний тиск стовпа рідини в циркуляційній трубі виштовхує розчин у киплячі труби, піднімається по них, частково випаровується і, звільнившись від пари зверху, повертається вниз по центральній трубі. Пар, що утворюється, видаляється у верхній частині пристрою, попередньо пройшовши через краплеуловлювач 4.

Недоліком пристрою є жорстка конструкція нагрівальної камери, яка не має температурної компенсації. Пристрої можна використовувати тільки для випаровування розчинів, які не кристалізуються, інакше в трубах можуть утворюватися кристалічні пробки.

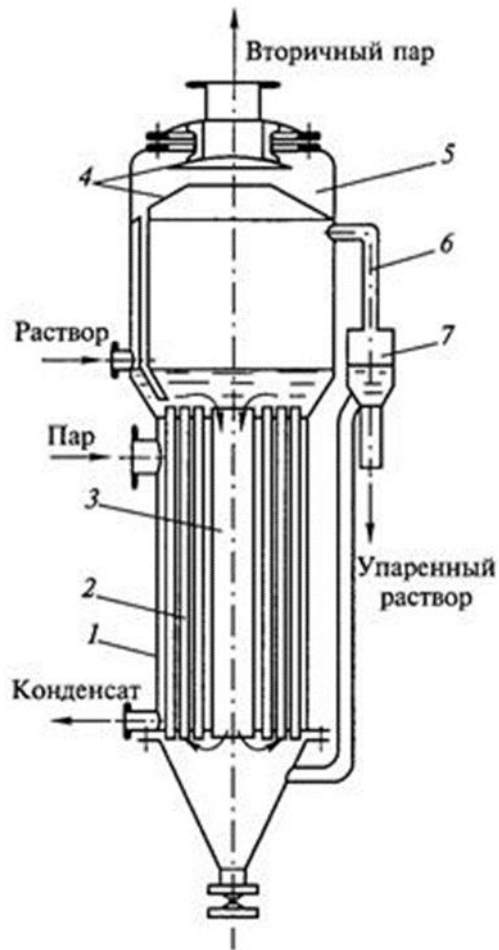


Рис. 1.1. Схема випарного апарату з центральною циркуляційною трубою:

1 — корпус; 2 — кип'ятильні трубки; 3 — циркуляційна труба; 4 — краплевловлювач; 5 — сепаратор; 6 — труба; 7 — ліхтар

Випарник з підвісною камерою нагріву (рис. 1.2) складається з камери нагріву 4, яка вільно витягнута всередину корпусу 5, спираючись на ніжки 6. Нагрівальна пара розташовується в міжтрубному просторі камери нагріву по трубі 3. , конденсат видаляється через патрубок 7. Вторинна пара, що утворюється, проходить сепараційний простір над нагрівальними трубками, а потім інерційний краплеуловлювач 1, з якого вловлена рідина стікає по трубі 2.

Тут діє принцип циркуляції: погано емульгований розчин через високу щільність спускається вниз по кільцевому простору між корпусом.

пристрій і нагрівальна камера, штовхаючи вгору легшу парову емульсію, яка постійно утворюється в трубах.

За рахунок більшого перерізу кільцевого каналу гідравлічний опір циркуляційного контуру тут менший, що призводить до збільшення швидкості циркуляції розчину.

Однак пристрої такого типу мають трохи більшу матеріаломісткість, ніж ті, що мають центральну циркуляційну трубу. Вони також не можуть обробляти високов'язкі та кристалізуються розчини.

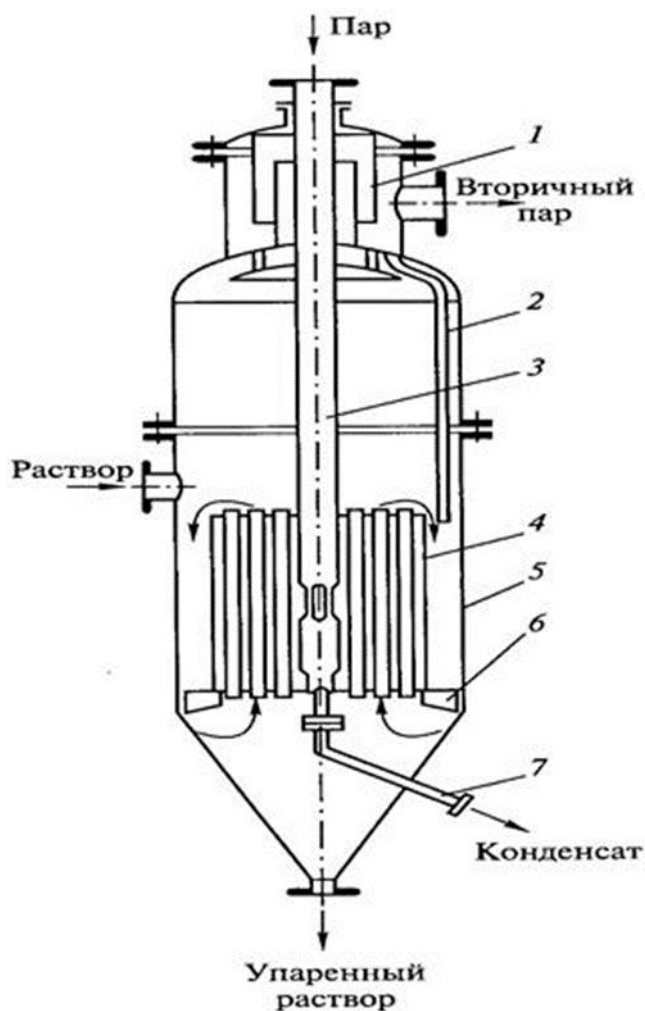


Рис. 1.2 Схема випарного апарату з підвісною гріючою камерою:

1 — краплєвловлювач; 2 — труба для стікання уловленої рідини; 3 — труба для подачі гріючої пари; 4 — гріюча камера; 5 — корпус; 6 — лапа; 7 — труба для видалення конденсату

Випарний апарат з подовженою нагрівальною камерою (рис. 1.3) складається з нагрівальної камери (котла) 2 і сепаратора 6, з'єднаних між собою патрубком 3 і циркуляційним трубопроводом 8. По цьому трубопроводу проходить більша частина концентрованого розчину повертається назад у нижню частину котла, змішуючи з вихідним розчином, який подається через форсунку 1. Частина концентрованого розчину виводиться із сепаратора у вигляді готового продукту через форсунку 7. Друга пара, пройшовши через бризкозловлювач 5, видаляється із сепаратора через верхнє сопло 4.

Висота труб в таких апаратах становить 5 ... 7 м. Поперечний переріз циркуляційної труби дорівнює або перевищує площу поперечного перерізу всіх кип'ятильних труб. Внаслідок великої руйнівної сили циркуляції (різниці тисків між стовпом твердої некиплячої рідини в циркуляційному трубопроводі 8 і пароемульсії в трубах середнього кипіння) при малому гідравлічному опорі циркуляційного контуру, швидкість циркуляції розчину значна (до 1,5 м/с).

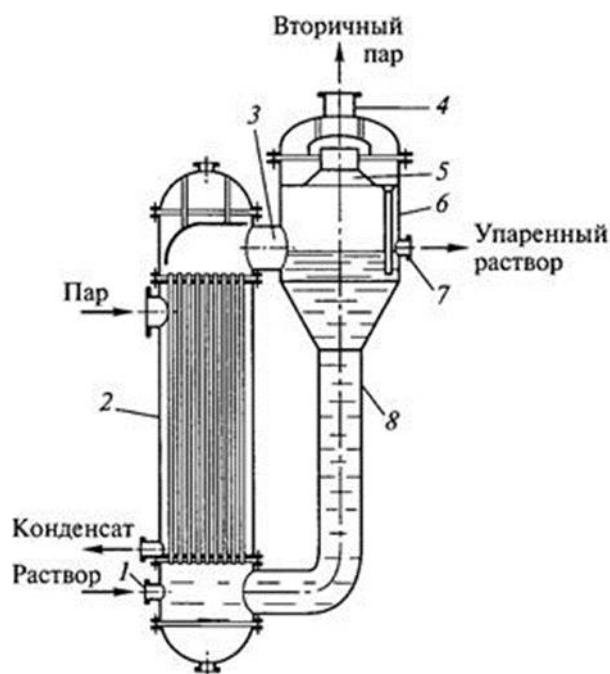


Рис. 1.3. Схема випарного апарата з винесеною гріючою камерою:

1, 7 — патрубки; 2 — нагрівальна камера; 3, 4 — патрубки; 5 — бризкозловлювач; 6 — сепаратор; 8 — циркуляційна труба

Для розділення розчину на розчинник і розчинену речовину використовують випарник із розширеною зоною кипіння (рис. 1.4). За цих умов речовина часто випадає з розчину у вигляді кристалів. У таких випадках зазвичай використовують апарати з виносною камерою нагріву і виносною зоною кипіння. Нагрівальна камера 1 з'єднана з сепаратором 2 патрубком 3. Рівень рідини в сепараторі підтримується на лінії верхнього зрізу патрубка 3, що досягається відбором суспензії через ліхтар 4. У нагрівальних трубах, розчин відчуває додатковий тиск рідини, що знаходиться в трубі 3. Висота підйомної труби, тобто гідростатичний тиск рідини підбирається таким чином, щоб в нагрівальних трубах відбувався тільки нагрів розчину. Інтенсивне пароутворення починається тільки при переході розчину в стояк і сепаратор. Різниця тиску між тиском рідини в сепараторі і пароемульсії в стояку забезпечує природну циркуляцію розчину. Для зменшення опору циркуляційного контуру відношення перетину підйомної труби до перетину нагрівальних труб (з урахуванням збільшення об'єму утворюється пароемульсії) прийнято рівним 1,5 .. 2,0.

Залежно від довжини труб, різниці температур пари і рідини, а також тиску в сепараторі швидкість циркуляції розчину в трубах знаходиться в межах 1,2 ... 2,0 м/с.

Висока швидкість циркуляції, видалення зони кипіння від нагрівальних трубок і підтримання постійної кількості кристалів в циркулюючої суспензії (не менше 5 ... 10%) у багатьох випадках перешкоджають утворенню накипу і кристалів на нагрівальних трубках.

Швидкість циркуляції в цих пристроях обмежена. Для підтримки високих швидкостей циркуляції необхідна різниця температур гріючої пари і розчину (до 20 ... 25 °C). Тому не завжди вдається запобігти утворенню в них накипу і кристалів.

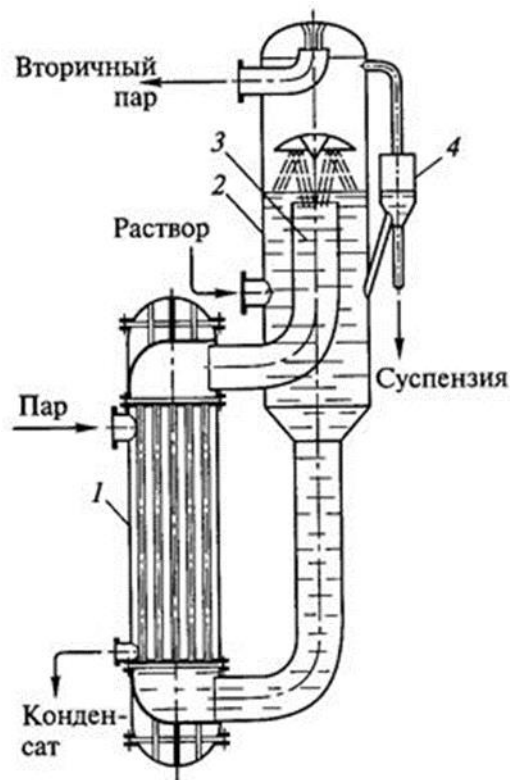


Рис. 1.4. Схема випарного апарату з винесеною зоною кипіння:
1 —нагрівальна камера; 2 — сепаратор; 3 — труба; 4 — ліхтар

Випарний апарат з примусовою циркуляцією розчину (рис. 1.5) використовується для створення високих швидкостей руху випареного розчину відносно поверхні теплообміну. деякі в цьому випадку використовують пристрої з виносною камерою нагріву. Розчин прокачується через камеру нагрівання 1, сепаратор 2 і зворотний патрубок 4 насосом 5 (відцентровим або осьовим).

Ось більш ефективний насос, який перекачує велику масу рідини з невеликим протитиском. Живильний розчин подається в зворотний трубопровід і змішується з великою кількістю циркуляційного розчину. Підвіска знімається через ліхтар 3.

Конструкція та експлуатація таких випарників є дорожчою через високу вартість насоса та великі витрати енергії на перекачування. Оптимальна швидкість циркуляції розчину по трубах 2 ... 3 м/с.

При менших швидкостях можливе відкладення солей на поверхні теплопередачі. Збільшення швидкості циркуляції є економічно невигідним через різке збільшення гідравлічного опору контуру, а також більших витрат енергії на привід насоса. Крім того, при швидкості руху розчину вище 3,0...3,5 м/с стає помітним механічне зміщення кристалів (при випаровуванні розчинів до появи твердої фази).

Висока швидкість циркуляції в цих апаратах може бути забезпечена при будь-якій невеликій різниці температур конденсуючої пари і циркулюючого розчину. Тому вони створили найсприятливіші умови для запобігання утворенню стінових відкладень.

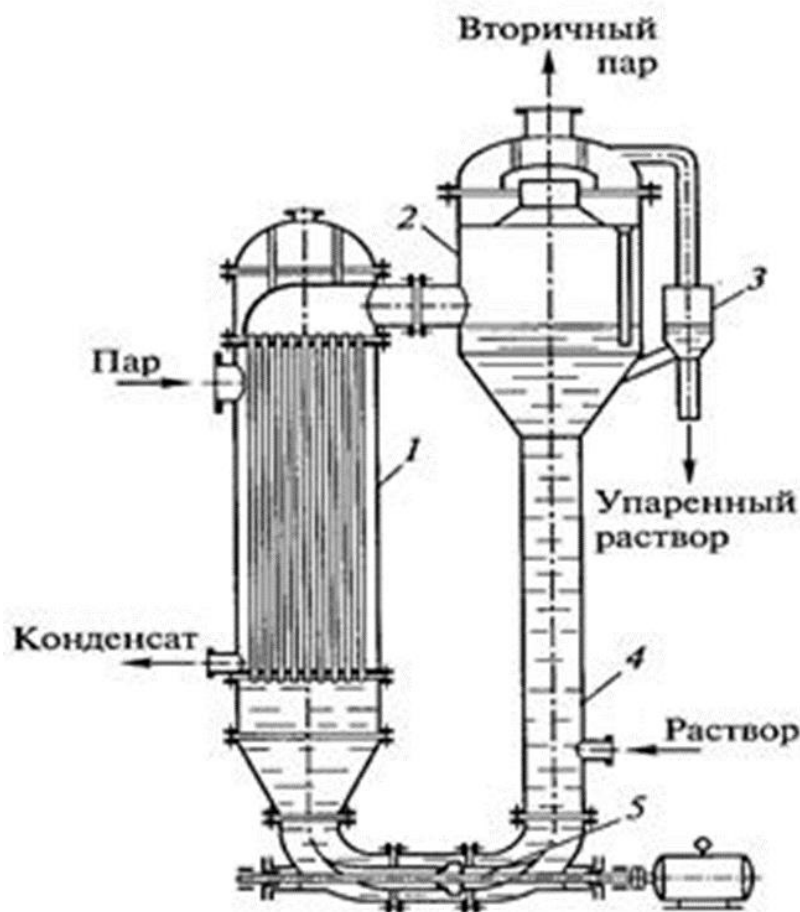


Рис. 1.5. Схема випарного апарату з примусовою циркуляцією розчину: 1 — нагрівальна камера; 2 — сепаратор; 3 — ліхтар; 4 — труба; 5 — насос

Випарник з піднімаючою плівкою (рис. 1.6) складається з киплячої труби великої висоти (b... 9 м), що дозволяє випаровувати розчин від початкової до кінцевої концентрації за один проход через киплячу трубу. (без тиражу).

Свіжий розчин, нагрітий до температури кипіння, подають у розташовані нижче трубки через патрубок 1 у нижній частині апарата. Киплячи в нижній частині трубок, розчин у вигляді пароемульсії піднімається вгору, створюючи режим кипіння майже по всій довжині трубок.

Цей кільцевий режим забезпечує значення великих коефіцієнтів тепловіддачі.

Якщо пробірки довгі, достатньо одного проходження розчину через апарат, щоб випарити його до необхідної концентрації. Концентрований розчин викидається з трубок у верхній частині апарата в сепаратор 2 і у вигляді готового продукту виводиться через патрубок 3.

Пристрій може працювати при меншій різниці температур нагріваючої пари і розчину, ніж випарні пристрої з природною циркуляцією цього розчину. Відсутність циркуляції і висока швидкість руху випареного розчину по трубках зумовлюють його короткочасне перебування в апараті. Кип'ятіння в плівці, а не в зростаючому об'ємі розчину запобігає утворенню піни. Тому використання цих апаратів особливо доцільно при випаровуванні пінистих розчинів, а також розчинів, які погано переносять перегрів і чутливі до тривалого нагрівання. Недоліком цих пристроїв є те, що в них необхідно підтримувати постійний термо- і гідродинамічний режим, оскільки при недостатній подачі розчину можливе пересихання стінок, що абсолютно неприпустимо через їх заростання шаром кристалів, а при подача прикладена.

— зменшення концентрації розчину, що випаровується. Ці пристрої не підходять для приготування розчинів, які кристалізуються.

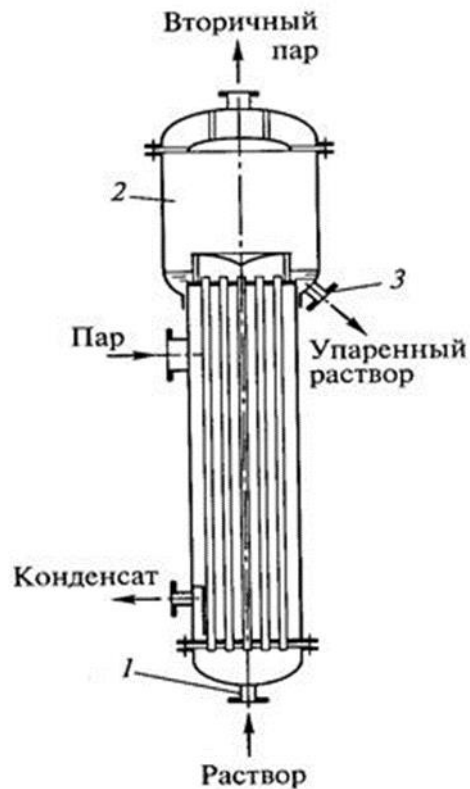


Рис. 1.6. Схема выпарного аппарата с плівкою, що підіймається: 1, 3 — патрубки; 2 — сепаратор

Випарник з низькою (спадаючою) плівкою (рис. 1.7) спеціально розроблений для розчинів, чутливих до тривалого впливу високих температур. У цьому апараті розчин подається на верхню трубну решітку 1, звідки він у вигляді тонкої плівки стікає по стінках кип'ятильної трубки 2. Для створення тонкої стійкої плівки у верхній частині трубки спец. встановлені розподільні пристрої. Випарений розчин відокремлюється від вторинної пари в сепараторі 3. У цьому апараті по всій висоті нагрівальних трубок існує кільцевий режим з високим значенням коефіцієнта тепловіддачі, а час перебування розчину в трубках становить менше, ніж пара, захоплена розчином, сприяючи більшій швидкості потоку плівки.

Цей апарат може працювати при меншій різниці температур між парою, що конденсується, і розчином, ніж випарник з плівкою, що

піднімається. У приладі можна створити такий режим роботи, при якому пар буде утворюватися не на стіні, а на поверхні плівки з боку парового простору. В результаті знижується ризик утворення накипу та кристалів, запобігає піноутворення та полегшується вторинне відділення пари.

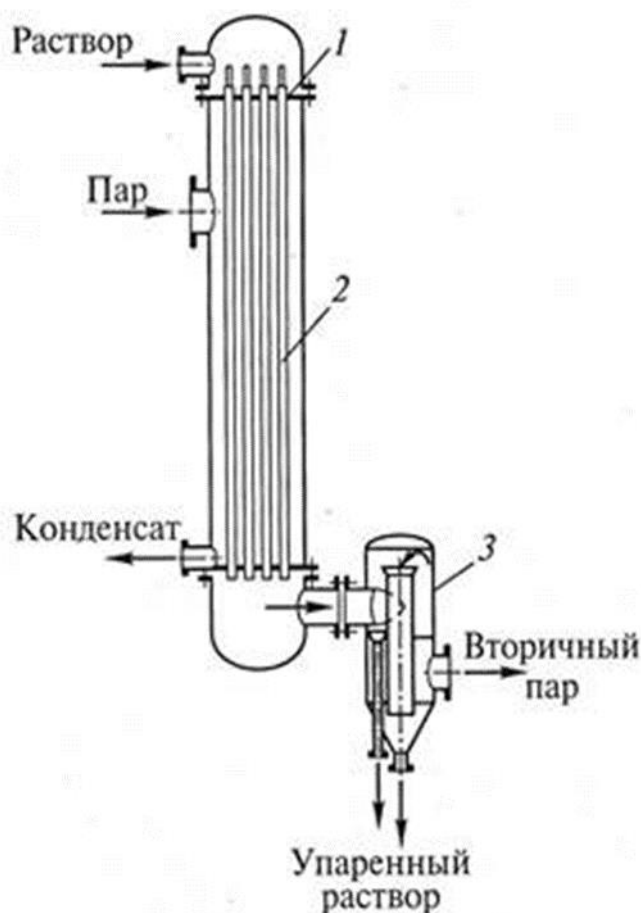


Рис. 1.7. Схема випарного апарату з низхідною (падаючою) плівкою: 1 – трубна решітка, 2 — кип’ятильна трубка, 33 — сепаратор

Роторний випрямляч (рис. 1.8) використовується для випаровування в'язких і пастоподібних розчинів, нестійких до підвищених температур. Усередині циліндричного корпусу 1 пристрою, оснащеного паром таких насадок 4, обертається ротор, що складається з вертикального вала 2 (розташованого по осі пристрою) і шарнірно закріплених на ньому скребків 3.

Випарений розчин проходить в апараті, захоплюючись скребками, що обертаються, під дією відцентрової сили відкидається до стінок

апарату і переміщається по їх внутрішній поверхні у вигляді плівки.

Поступово відбувається повне випаровування плівки і на стінках апарату утворюється тонкий шар порошку або пасти, який видаляється обертовими скребками (зазор між зовнішнім краєм скребків і стінкою апарату менше 1 мм). Твердий або пастоподібний продукт видаляється через спеціальну секторну заслінку з нижньої частини пристрою.

У роторних прямих апаратах досягається інтенсивний теплообмін (до 15 000 Вт/м² К)) з невеликим відведенням рідини вторинною парою. У той же час роторні машини складні у виготовленні і мають високу вартість використання через наявність обертових частин, непридатних для використання у великосерійному виробництві.

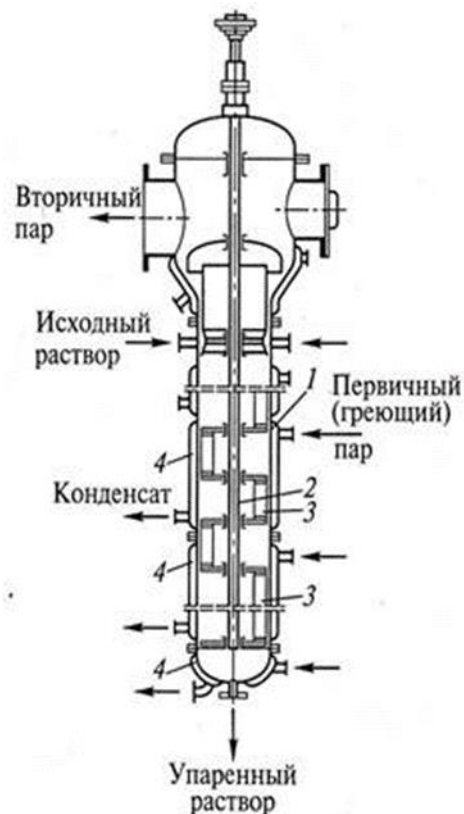


Рис. 1.8. Схема роторного прямих випарного апарату:

1 – корпус, 2 — вал, 3 — скребок, 3 – скребок, 4 – парова сорочка

Для виготовлення випарних апаратів як конструкційні матеріали застосовуються вуглецеві, кислотостійкі сталі і мідь.

Випарники та окремі елементи виготовляються із сталей, дозволених до застосування Держтехнаглядом: ВСтЗсп, ВСтЗГПс, 06ХН28МДТ, 09Г2С, 16ГС1, 08Х18Г8Н2Т, 08Х22Н6Т, 08Х21Н, 12Х18Н10Т,

10Х17Н13М2Т.

Крім того, використовують двошарові сталі з наплавкою: 08Х13, 12Х18Н10Т, 10Х17Н13М2Т.

Двошарова сталь СтЗ + 12Х18Н10Т використовується для виготовлення корпусів, що контактують з морською водою; внутрішні пристрої приладів оснащені нержавіючої сталлю 12Х18Н10Т.

1.5 Патентне дослідження випарних апаратів

Патентне дослідження – це системний науковий аналіз властивостей об'єкта господарської діяльності (ОГД) протягом його життєвого циклу, які впливають з правової охорони об'єктів промислової власності.

У даному випадку дослідження проводиться з метою визначення патентної ситуації щодо проєктованих апаратів (визначення їх патентоспроможності й тенденцій розвитку). Предметом патентного дослідження є випарний апарат, а об'єктами винаходи та корисні моделі. Дослідження проводилося на основі патентної бази України та Російської Федерації.

Провівши патентне дослідження можна побачити, що в даний час застосовуються різні типи апаратів, що проєктуються. Їх різноманіття обумовлюється сферою їх використання, особливістю теплових режимів та масообмінних процесів, що підтримуються під час проведення технологічного процесу. Патентний пошук та огляд літератури підтвердили відповідність обраних конструкцій сучасному науково-технічному рівню.

1.1 Порівняльний аналіз конструкцій випарного апарату з діючими аналогами

Таблиця 1.1 Регламент пошуку для порівняльного аналізу конструкцій випарного апарату

(форма Б.1 згідно з ДСТУ 3575-97)

Предмет пошуку (ОГД, його складові частини)	Мета пошуку інформації	Держава пошуку	Класифікаційні індекси: МПК,НПК,МКПЗ, МКТП,УДК	Ретроспективність пошуку	Джерела інформації
1	2	3	4	5	6
Випарний апарат	Визначення патентоздатності проєктованого апарату й визначення тенденцій розвитку цього напрямку в техніці	Україна, Російська Федерація	МПК6 і МПК7- B01D 1/00; B01D 1/06; B01D 1/22; F22B 37/00; F28D 9/00; УДК 621.929.3; 66.023 (088.8)	2001-2011	Описи до винаходів, офіційні патентні бюлетені Держпатенту України і Роспатенту

Таблиця 1.2 Джерела інформації, використані під час проведення пошуку конструкцій випарного апарату

Предмет пошуку (ОГД, його складові частини)	Держава пошуку	Класифікаційні індекси: МПК,НПК,МКПЗ, МКТП,УДК	Інформаційна база, використана під час пошуку	Бібліографічні дані за хронологією патентна інформація	Першого та останнього джерела інформації інша науково-технічна інформація
1	2	3	4	5	6
Випарний апарат	Україна, Російська Федерація	МПК6 і МПК7- B01D 1/00; B01D 1/06; B01D 1/22; F22B 37/00; F28D 9/00; УДК 621.929.3; 66.023 (088.8)	Фонд НТУУ "КПІ"; фонди Державної науково-технічної бібліотеки України; офіційні сайт Держпатенту України та Роспатенту.	Описи винаходів патентів України №№ 1-41000. Описи корисних моделей патентів України №№ 1-150. Описи винаходів патентів Російської Федерації №№ 200000-241000.	Національні й зарубіжні офіційні бюлетені, описи винаходів і корисних моделей; УРЖ "Джерело" (2005-2010pp.). Журнал "Хімічна промисловість України". Плановский А.Н., Николаев П.И. Процессы и аппараты химической и нефтехимической технологии.-М. Химия, 1987.-496с.

Таблиця 1.3 Патентна документація, відібрана для подальшого аналізу з обраною конструкцією випарного апарату

ОГД, його складові частини	Бібліографічні дані	Відомості, щодо їхньої дії
1	2	3
Випарний апарат з підвісною гріючою камерою	Патент № 72504 (UA), B01D 1/00, 1/06. Випарат апарний з підвісною гріючою камерою / Мовчанов Володимир Іванович (UA); Гринько Іван Дмитрович (UA); Гітіс Едуатр Борисович (UA); Ніколенко Валентина Миколаївна (UA); Костіна Тетяна Іванівна (UA). Заявка № 2001106716, 01.10.2001. Опубл. 15.03.2005; бюл. № 3, 2005р.	діє
Випарний апарат з природною циркуляцією	Патент № 77151 (UA), B01D 1/06. Випарний апарат з природною циркуляцією / Мовчанов Володимир Ігнатійович (UA); Гринько Іван Дмитрович (UA); Іващенко Олександр Яковлевич (UA); Гринько Олександр Іванович (UA). Заявка № 2002010670, 28.01.2002. Опубл. 15.11.2005; бюл. № 11, 2005р.	діє
Випарний апарат	Патент № 80776 (UA), B01D 1/00; F22B 37/00. Випарний апарат / Приходченко Вілен Антонович (UA). Заявка № а200601495, 14.02.2006. Опубл. 25.10.2007.	діє
Плівковий випарний апарат	Патент № 28618 (UA), B01D 1/22. Плівковий випарний апарат / Ладановський Михайло Іванович (UA); Василяка Олександр Сергійович (UA); Пристрома Євгеній Олександрович (UA). Заявка № u200712095, 01.11.2007. Опубл. 10.12.2007.	діє
Прямоточно-плівковий випарний апарат	Патент № 39933 (UA), B01D 1/22. Прямоточно-плівковий випарний апарат / Шущий Ігор Валентинович (UA). Заявка № u200807337,	діє

	27.05.2008. Опубл. 25.03.2009; бюл.№ 6, 2009р.	
Пластинчатий випарний апарат	Патент № 88836 (UA), B01D 1/00, 1/22; F28D 9/00. Пластинчатий випарний апарат / Данилов Юрій Борисович (UA); ТОВАЖНЯНСЬКИЙ Леонід Леонідович (UA); Перцев Леонід Петрович (UA). Заявка № а200805791, 05.05.2008. Опубл. 25.11.2009; бюл.№ 22, 2009р.	діє
Випарний апарат	Патент № 39933 (RU), B01D. Випарний апарат / Хомяков Анатолій Павлович (RU); Хомяков Константин Анатолійович (RU). Опубл. 10.03.2007.	діє
Випарний апарат	Патент № 2323762 (RU), B01D. Випарний апарат / Трофімоа Леон Ігнатович (RU); Подберезний Валерій Лазарович (RU); Нікулін Валерій Олексійович (RU). Опубл. 10.05.2008.	діє

1.6 Висновки

1. Проведені літературні дослідження підтвердили, що ітаконова кислота є широко використовуваною речовиною в найбільшій кількості галузей промисловості та найпоширенішою промисловістю - хімічною.

2. Розглянувши шляхи і методи випаровування, зробимо висновок, що випарні установки безперервної дії мають більшу продуктивність, економічніші за теплом, легко автоматизуються і регулюються.

3. Залежно від типу та умов виробництва, обсягів виробництва, габаритних розмірів та інших параметрів існує значна кількість типів випарників, які мають свої особливості та переваги перед іншими аналогами.

4. Патентний пошук та огляд літератури підтвердили відповідність відібраних розробок сучасному науково-технічному рівню.

1.7 Постановка задач дослідження

1. Дослідження процесів випарювання в випарному апараті з виносною гріючою камерою та природною циркуляцією;

2. Створення комп'ютерної моделі випарного апарату;

3. Дослідження характеристик міцності та стійкості випарного апарату та його констуктивних елементів;

2 МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ ВИПАРЮВАННЯ

2.1 Просте випарювання

Просте випарювання здійснюється на установках невеликої продуктивності, коли витрати теплоти не мають великого значення. Матеріальний баланс простого випарювання включає два рівняння, складені:

по матеріальних потоках

$$G_n = G_k + W \quad (1)$$

по розчиненій речовині

$$G_n x_n = G_k x_k$$

де G_n , G_k - масова витрата початкового (упарюваного) і кінцевого (упареного) розчину; W - масова витрата розчинника, що випарюється; x_n , x_k - відсотки (масові частки) розчиненої речовини в початковому і кінцевому розчинах..

Тепловий баланс простого випарювання може бути записаний на основі потоків приходу і витрати теплоти.

Визначимо: D - масова витрата гріючої пари; $i_{пар}$, $i_{в.п}$, $i_{конд}$ - питомі ентальпії гріючої і повторної пари, а також конденсату; t_n , t_k - початкова і кінцева температури розчину; Δq - теплота концентрування від концентрації x_n до концентрації x_k ; c_n , c_k - питома теплоємність вихідного (початкового) і кінцевого розчинів.

У цьому випадку тепловий баланс буде засновуватися на наступних теплових потоках:

Надходження теплоти

З вихідним розчином

$$G_n c_n t_n$$

З гріючим паром

Витрата теплоти

З кінцевим розчином

$$G_k c_k t_k$$

З вторинним паром

$Di_{пар}$ $Wi_{в.п}$

З теплою концентрування

 $0,01G_K x_K \Delta q$

З конденсатором

 $Di_{конд}$

Теплові втрати

 $Q_{п}$

Тоді тепловий баланс простого випарювання буде:

$$G_H c_H t_H + Di_{пар} = G_K c_K t_K + Wi_{в.п} + 0,01G_K x_K \Delta q + Di_{конд} + Q_{п} \quad (3)$$

Замінивши у рівнянні (3) відповідно до рівняння (1) G_H на $G_K + W$ та вирішивши його відносно витрати гріючої пари, отримаємо

$$D = G_K \frac{c_K t_K - c_H t_H + 0,01 x_K \Delta q}{i_{пар} - i_{конд}} + W \frac{i_{в.п} - c_H t_H}{i_{пар} - i_{конд}} + \frac{Q_{п}}{i_{пар} - i_{конд}} \quad (4)$$

З рівності (4) випливає, що загальний потік пари - це додаткові три доданки, які можна інтерпретувати наступним чином: перший - потік пари для зміни теплоємності пароподібного розчину, другий - потік пари для утворення повторний пар, і третій - потік пари для компенсації втрат тепла в навколишнє середовище.

Значення першого і останнього складів малі порівняно з іншими, тому при наближених розрахунках вважається, що на 1 кг випареної з розчину води потрібно витратити 1,1...1,2 кг гріючої пари.

Площа теплообмінної поверхні випарного апарату за основним рівнем тепловіддачі

де Q - теплове навантаження апарату; K - коефіцієнт теплопередачі; $\Delta t_{n,p}$ - корисна різниця температур.

При розрахунках випарних апаратів враховують наступні температурні характеристики:

- загальну різницю температур - різниця між температурою гріючої пари $t_{гр.п}$, що поступає у випарний апарат, і температурою вторинної пари $t_{в.п}$, яка відбирається з апарату:

$$\Delta t_{общ} = t_{гр.п} - t_{в.п}$$

- корисну різницю температур, яка завжди менше загальної різниці температур на величину температурних втрат (депресій),

$$\Delta t_{п.р} = \Delta t_{общ} - \sum \Delta t_{пот}$$

- температурні втрати (депресії), які складаються з температурної, гідростатичної і гідравлічної депресій,

- температурну депресію $\Delta t_{m.д}$ - різницю між температурами кипіння розчину і чистого розчинник;

- гідростатичну депресію $\Delta t_{г.д}$ - підвищення температури кипіння розчину за рахунок гідростатичного тиску стовпа рідини в трубах випарного апарату;

- гідравлічну депресію $\Delta t_{г.н}$ - втрати температури вторинної пари, викликані гідравлічними опорами на виході з випарного апарату.

2.2 Моделювання процесів випарювання

Процес випаровування широко використовується в харчовій промисловості головним чином для підвищення концентрації розчинених речовин у розчині. Зазвичай упарюють водні розчини - бурякові, фруктові та овочеві соки, сиропи, барду, кормові дріжджі, пектиновий клей, молоко та ін. Крім того, упарювання необхідно для відділення розчинених речовин у твердому стані, виділення чистого розчинника, тепла. поглинання з охолоджувального середовища та інші цілі [6]. Випарювання здійснюють у випарних апаратах різного призначення і конструкції.

Вибір конструктивно-технологічної схеми випарних апаратів окремо за особливостями технологічної схеми підприємства, властивостями

випарного розчину, призначення процесу випарювання, традиції в даному виробництві і т. д. Випарники відрізняються режимними характеристиками, статичними і динамічними властивостями. Робота випарників технологічно пов'язана з різними типами конденсаторів, теплообмінників і т.д.

Рівень киплячого розчину h над нижньою поверхнею розчину вище п'єзометричного рівня h некиплячої рідини в мірному скляному апараті через різницю в густині парорідинної емульсії і розчину, оскільки густина киплячої емульсії менша за густину розчину.

Незалежно від конструкції і призначення кожного випарника він характеризується такими вхідними параметрами: витратою рідини, що випаровується, S_n та її початковою концентрацією b_n , теплоємністю s_n , і густина ρ_n , витрата гріючої пари D_n та її температура t_n або ентальпія i_p , теплоємність s_p , густина ρ_p . Ці параметри, що характеризують вхідні потоки, можуть бути керуючими. Процес випаровування із збільшенням і конструктивні параметри: маса металу корпусу G_m , площа поверхні нагріву F , об'єм пристрою V , маса ізоляції G . [6]

Вихідними параметрами є витрата концентрованого розчину S_k і його концентрація b_k , густина ρ_k і теплоємність s_k , рівень киплячої рідини h , витрата конденсату D_k і його температура t_k , витрата вторинної пари W і витрата пари для видалення неконденсованих газів D' .

Внутрішніми параметрами можуть бути маса пари в апараті або нагрівальній камері G_p , маса конденсату G_k , температура киплячої рідини $t_{ж}$, внутрішня енергія рідини або окремих частин апарату i , їх температура t , тиск в апараті p та ін.

Основними рівнями, що з'єднують вхідні та вихідні характеристики процесу випаровування, є:

1. Рівняння матеріального балансу:

$$S_n = S_k + W; \quad (5)$$

2. Рівняння балансу для сухих речовин:

$$S_{\Pi}CB_{\Pi} = S_KCB_K ; \quad (6)$$

3. Рівняння теплового балансу:

$$S_H ct_H + Q_{\Pi} = Wt + S_K c_K t_K + Q_{\text{пот}} ; \quad (7)$$

4. Рівняння визначення витрати гріючої пари:

$$D = W \frac{i - c_B t_K}{i'' - i'} + S_H c_B \frac{t_K - t_H}{i'' - i'} + \frac{Q_{\Pi}}{i'' - i'} ,$$

де c_B – теплоємність води; $Q_{\text{пот}}$ – витрати теплоти; Q_{Π} – теплоємність пари; i, i'', i' – ентальпія вторинної пари, пари на обігрів, конденсата.

Основною технологічною метою процесу випарювання в харчових виробництвах є забезпечення заданої концентрації випарного розчину. Наприклад, концентрація випарного дифузійного соку цукрових заводів після багатокорпусної установки повинна мати 65% КСВ. Основною загальною оцінкою процесу випаровування є питома вартість випаровування 1 м * води. Приватні оцінки - це конкретні витрати або витрати пари, тепла чи електроенергії, капітальні, експлуатаційні чи інші витрати, які характеризують окремі аспекти цього складного процесу. [6]

Узагальненим критерієм техніко-економічної ефективності процесу випарювання є вираз:

$$Z_p = C_Q Q_T + C_{el} Q_{el} + (1,56 p_{\delta} + p_n)(C_F F + K_{y\delta}) \mathcal{E}_{np}$$

де Z_p – розрахункові затрати на випарювання 1 м³ води; C_Q, C_F, C_{el} – ціна теплоти, поверхні нагріву та електроенергії; Q_T, Q_{el} – витрата теплоти та електроенергії; $p_{\delta} + p_n$ – надлишковий тиск в парорідинному просторі; F – величина площі поверхні нагріву; $K_{y\delta}$ – питомі приведені капітальні затрати; $\mathcal{E}_{np}$ – приведені експлуатаційні витрати.

У процесі випаровування істотно змінюються витрати на характеристики розчину, що випаровується, і витрати на тиск вторинної пари. Ці зміни характеризуються постійними збуреннями безперервної дії (з боку споживачів),

а також впливами під час аварійних ситуацій. Внутрішня обробка викликається зміною термічного опору внаслідок утворення накипу, властивостей розчину при випаровуванні, а також накопиченням неконденсованих газів та іншими неконтрольованими впливами.

Найважливішими завданнями управління випаровуванням є забезпечення заданої концентрації розчину на виході та забезпечення споживачів тепла парою із заданими характеристиками. Окремими завданнями управління можуть бути стабілізація рівня в апаратах, вакууму в концентраторі, отримання необхідного кольору розчину і т. д. Кінцевою метою управління є забезпечення мінімальних витрат на процес випаровування, тобто мінімальних значень техн. та економічні критерії.

2.3 Модель технологічного розрахунку режимів випарювання

Моделювання процесу випаровування в харчових виробництвах особливості, пов'язані з властивостями випарених розчинів. Наприклад, при випарюванні дифузійного соку цукрового виробництва у вторинній парі виникають інертні гази, які складаються в основному з вуглекислого газу, аміаку та всіх компонентів повітря, які істотно впливають на технологічні режими процесу випарювання.

Утворення аміаку і вуглекислого газу пов'язане з тим, що дифузійний сік перед випаровуванням піддається дефекації (обробка CaO). насичення (обробка CO_2) і сульфатація (обробка SO_2). В результаті такої обробки утворюються аміак і вуглекислий газ. Кількість аміаку міститься в буряках аміачного та амідного азоту, а кількість вуглекислого газу – окислювачів калію та натрію K_2O , Na_2O , які при насиченні окислюються до гідрокарбонатів. Кількість викидається у вторинні пари повітря за режимами роботи випарної установки. Виходячи з відомих концентрацій цих компонентів у соку, можна розрахувати збір інертних газів G_{in} у вторинній парі.

На перших ступенях деяких випарних установок застосовуються прямоточні апарати, які працюють майже без циркуляції і з найменшими втратами цукру.

Сульфітований сік надходить під нижню трубну решітку апарату, проходить через трубки, де закипає за рахунок тепла, що підводиться гріючою парою. Після виходу з труб частина води з соку випаровується і разом з газами розкладання йде через надсоковоий простір апарату. При цьому частково розкладається цукор. З урахуванням цих особливостей зв'язку між вхідними та вихідними параметрами випарного апарату в статисти можна наближено описати системою рівнянь [6].

$$S_{\text{н}} = S_{\text{к}} + W;$$

$$S_{\text{н}} c_{\text{н}} t_{\text{н}} + Q = S_{\text{к}} c_{\text{к}} t_{\text{к}} + W i;$$

$$W^D = \frac{18 P_W}{P - P_W} G_{\text{ин}}; \quad (8)$$

$$t_{\text{к}} = \frac{\Psi_2(CB_{\text{к}})}{(g P_W - \Psi_1(CB_{\text{к}}))} + \frac{G_{\text{к}}^{\text{нес}}}{G_{\text{к}}^{\text{вс}} (6,81 - 0,056 CB_{\text{к}}) - c}; \quad (9)$$

де, P_W – парціальний тиск вторинної пари, яке визначається відношенням

$$\lg P_W = \Psi_1(CB_{\text{к}}) + \frac{\Psi_2(CB_{\text{к}})}{C t_{\text{к}}};$$

$\Psi_1(CB_{\text{к}})$, $\Psi_2(CB_{\text{к}})$ – величини, що залежать від масової концентрації сухих речовин на виході з апарату ($CB_{\text{к}}$); C – стала; $t_{\text{к}}$ – температура кипіння соку, °C; $G_{\text{ин}}$ – молярна витрата інертних газів, кмоль/год; $G_{\text{н}}^{\text{нес}}$, $G_{\text{н}}^{\text{сах}}$ – витрата несахарів та води на виході з апарату; P – тиск в апараті; Q – теплота, що підводиться в апарат з гріючою парою.

Наведена система складається з рівнянь матеріального і теплового балансів апарату, закону Дальтона (9) і рівняння для визначення температури соку на виході з апарату $t_{\text{к}}$, отриманого з урахуванням поправки на його якість.

Система з чотирьох рівнянь містить чотири невідомі величини ($S_{\text{к}}$, W , $t_{\text{к}}$, t_{w}), тобто при відомих вихідних даних дозволяє однозначно визначати всі невідомі параметри. Проте ряд величин, які входять в цю систему, визначаються додатковими співвідношеннями.

Витрати розчину, що випарюється на вході і виході залежать від змісту сахарів і несахарів.

$$S_H = G_H^{\text{вод}} + G_H^{\text{сах}} + G_H^{\text{нес}}; \quad (10)$$

$$S_K = G_K^{\text{вод}} + G_K^{\text{сах}} + G_K^{\text{нес}}; \quad (11)$$

Теплоємність розчину, що випарюється на вході та виході пов'язана із вмістом сухих речовин та доброякісністю.

$$c = 1 - b[0,6 - 0,0018t + 0,0011(100 - D6)]; \quad (12)$$

Доброякісність, в свою чергу, визначається відношенням

$$D6 = \frac{100G}{G^{\text{сах}} + G^{\text{сах}}}$$

а доля сухих речовин

$$b_1 = G^{\text{сах}} + G^{\text{сах}}$$

або масова концентрація

$$CB = \frac{100(G^{\text{сах}} + G^{\text{сах}})}{S}$$

Густина розчину

$$\rho = 1011,8 + 3,4CB + 0,02CB^2 - (0,4 + 0,0025CB) \cdot (t - 20); \quad (13).$$

Ентальпія вторинної пари ів складається з енергії, затраченої на нагрівання рідини до температури t_W та випарування $i_W = i_g - i_H$

$$\begin{cases} i_W = 0,99615t_W + 1,8239 \cdot 10^{-6}t_W^2 - 0,13468 \cdot 10^{-0,036t_W} + 0,1346 \\ i_H = 597,34 - 0,5550t_W - 0,2389 \cdot 10x = 5.1463 - \frac{1540}{T_W} \end{cases} \quad (14)$$

де x – вологовміст повітря.

Тиск в парорідинному просторі визначаємо з рівняння

$$\begin{aligned} \lg P_W = 0.0141966 - 3.142305 \left(\frac{10^3}{T_W} - \frac{10^3}{373,15} \right) + \\ + 8,21 \cdot \lg \left(\frac{373,15}{T_W} \right) - 0,0024804(373,15 - T_W); \end{aligned} \quad (15)$$

де $T_W = t_W + 273.15 \text{ K}$.

$$G_{\text{ин}} = \frac{G_{NH_3}}{17} + \frac{G_{CO_2}}{44} + \frac{G_{\text{вод}}}{29,8}; \quad (16)$$

$$G_k^{сах} = G_n^{сах} + G_{разл}; \quad (17)$$

$$G_k^{нес} = G_n^{нес} + G_{разл}; \quad (18)$$

$$G_{разл} = G_n^{сах} (1 - e^{k\tau}); \quad (19)$$

де константа розкладання сахарів k та час випарювання τ

Середнє значення температури випарюваного розчину та кислотність визначаються співвідношеннями

$$T_{cp} = t_{cp} + 273.15, \quad \text{де } t_{cp} = \frac{t_n + t_k}{2}; \quad (20)$$

$$pH_{cp} = pH_n - 0,0175(t_{cp} - 25); \quad (21)$$

Постійна C при даних умовах дорівнює 230, функції $\Psi_1(CB_k)$ в залежності від меж масової долі сухих речовин в розчині на виході із апарату мають конкретний вид при $CB_k < 40\%$

$$\Psi_1^I(CB_k) = 7,48 + 0,025 \cdot CB_k;$$

$$\Psi_2^I(CB_k) = -1411 - 10,67 \cdot CB_k \quad \text{при } 40\% \leq CB_k \leq 75\%;$$

$$\Psi_1^{II}(CB_k) = 9,51 - 0,0254 \cdot CB_k;$$

$$\Psi_2^{II}(CB_k) = -2104 + 6,66 \cdot CB_k \quad \text{при } CB_k > 75\%;$$

$$\Psi_1^{III}(CB_k) = 0,73 + 0,01916 \cdot CB_k;$$

$$\Psi_2^{III}(CB_k) = 540 - 28,6 \cdot CB_k$$

(22)

Для конкретних умов харчового підприємства системи чотирьох рівнянь (5), (7), (8), (9) недостатньо, щоб описати зв'язки між характеристиками процесу. У зв'язку з цим система повинна бути доповнена рівняннями (10, 22). З огляду на, що невідомі величини входять в ці додаткові рівняння нелінійно, виникають значні труднощі при вирішенні розширеної системи рівнянь[6].

Для вирішення цієї системи рівнянь було запрограмовано метод наступних наближень. Максимум вторинної пари дозволяє змінювати кількість вторинної пари, використовуючи її залежність від тиску. Правильність вибору температури вторинної пари контролюють за рівнем кількості водяної пари за законом Дальтона (8) з використанням рівня отриманого сумісним рішенням рівня матеріального і теплового балансів апарату

$$W^T = \frac{Q_{\text{пр}} - S_{\text{к}} c_{\text{к}} t_{\text{к}}}{i_{\text{в}} - c_{\text{к}} t_{\text{к}}} \quad (23)$$

$$Q_{\text{пр}} = S_{\text{н}} c_{\text{н}} t_{\text{н}} + Q_{\text{п}} \quad (24)$$

де $Q_{\text{п}}$ – кількість тепла, що підводиться гріючою парою.

Розрахунок виконується в наступному порядку:

1. Спочатку вводять вихідні дані, що характеризують властивості розчину, що надходить в апарат: витрата $S_{\text{н}}$, склад $G_{\text{н}}^{\text{вод}}$ (масова частка води в соку); $G_{\text{н}}^{\text{сах}}$ (масова частка сахарів); і $G_{\text{н}}^{\text{нес}}$ (масова частка несахарів); температура $t_{\text{н}}$, масова концентрація $CB_{\text{н}}$ і частка $b_{\text{н}}$ сухих речовин; доброякісність $DB_{\text{н}}$ і кислотність $pH_{\text{н}}$ при 25 °C, що надходить на випарювання дифузійного соку; потім геометричні розміри апарата і поверхні нагріву; діаметр апарату $D_{\text{ап}}$; діаметр труб $d_{\text{тр}}$, довжина $l_{\text{тр}}$, число труб n [6].

Потім вводять або розраховують характеристики: висоту шару рідини над трубною решіткою h , кількість тепла, що підводиться з парою $Q_{\text{п}}$ та тиск в апараті P .

2. Розраховують всі величини, які в процесі подальших розрахунків не змінюються $G_{\text{ин}}$ (16), теплоємність c (12), густину ρ розчину, кількість енергії, що підводиться $Q_{\text{пр}}$ (24).

3. Приймавши в першому наближенні $i = 1$) деяке числове значення величини $t^{\text{в}}$, визначають кількість водяної пари відповідно до закону Дальтона $W^{\text{Д}}$ (8), для чого знаходять $P^{\text{в}}$ по (15).

4. Розраховують витрату вторинної пари W^T по (23). Розрахунки проводять у такій послідовності-

- а) знаходять $S_{\text{к}}$ (5), $CB_{\text{к}}$ (6), $\Psi_1(CB_{\text{к}})$ і $\Psi_2(CB_{\text{к}})$ (22);

б) прийнявши $G_n^{сах} + G_n^{нес} = G_k^{сах} + G_k^{нес}$, знаходять $G_k^{вод}$ (11); прийнявши $G_n^{сах} = G_k^{сах}$, знаходять t_k (9);

в) визначають t_{cp} і T_{cp} (20), густину $\rho_{ж}$ (13), час виконання τ , кислотність pH_{cp} (21), константу розкладання цукрів k , кількість сахарів, що розклалися $G_{раз}$, $G_n^{нес}$ (19), концентрації сахарів і несахарів на виході $G_k^{сах}$ (17) та (18); доброякісність $D6$, теплоємність c (19):

г) розраховують температуру вторинної пари T^W (16); її ентальпію i_w (14); витрату W^r (193).

5. Порівнюють величини W^D і W^T . Якщо вони значно відрізняються, то повторюють розрахунок, починаючи з п. 3, в такій же послідовності до тих пір, поки не буде досягнута задана точність розрахунку.

2.4 Висновки

1. Математичні моделі випарних установок використовуються для встановлення зв'язків між вхідними та вихідними параметрами, визначення режимів роботи існуючих установок та розрахункових параметрів проєктованих. Крім того, для визначення динамічних характеристик МВУ широко використовується математичне моделювання. Це дає змогу значно скоротити витрати на вибір та обґрунтування режимно-проектних параметрів і системи контролю випаровування.

2. Моделювання процесів випарювання має досить трудомісткий розрахунок, тому його доцільно проводити на ЕОМ з використанням алгоритму розрахунку технологічних режимів роботи випарного апарату.

3. КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВИПАРНОГО АПАРАТУ З ВИНОСНОЮ ГРІЮЧОЮ КАМЕРОЮ

3.1 Порівняльний аналіз труб різної геометрії в гріючій камері

З метою підтвердження доречності зміни геометрій труб було проведено порівняльний аналіз у програмі SolidWorks, де були побудовані модель гладкої труби та спіральний відбивач (рис. 6).

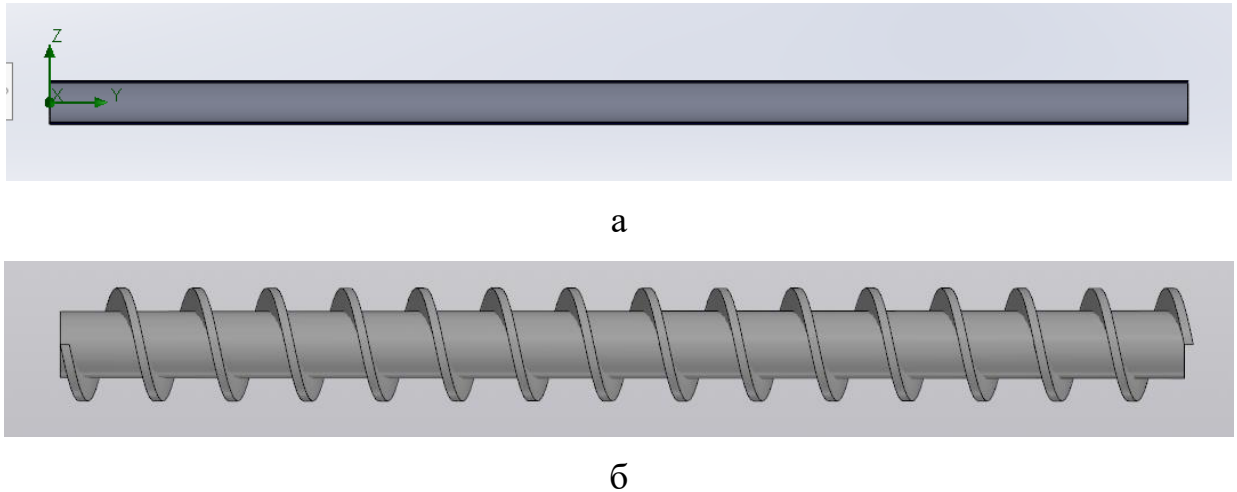


Рис. 6 Конструкція труб : а – гладка; б – спіральний відбивач

Основною умовою моделювання було задання турбулентного режиму руху гарячого теплоносія, що являє собою пару з температурою 127 °С та швидкістю 15 м/с. Розчин подається всередину труб за з температурою 80 °С та швидкістю 2 м/с. Так як задача є зовнішньою, властивостями розчину можна знехтувати. Матеріал труби – нержавіюча сталь 12Х18Н10Т, товщина стінки – 3 мм, коефіцієнт теплопровідності становить 16 Вт/ м·°С [18]. Висота ребер відносно поверхні становить 5 мм з шагом 25 мм. Час випробування – 10 с. Під час проведення дослідження не враховувалися фазові переходи.

Після отримання результатів спершу проведемо аналіз гладкої труби (рис. 7).

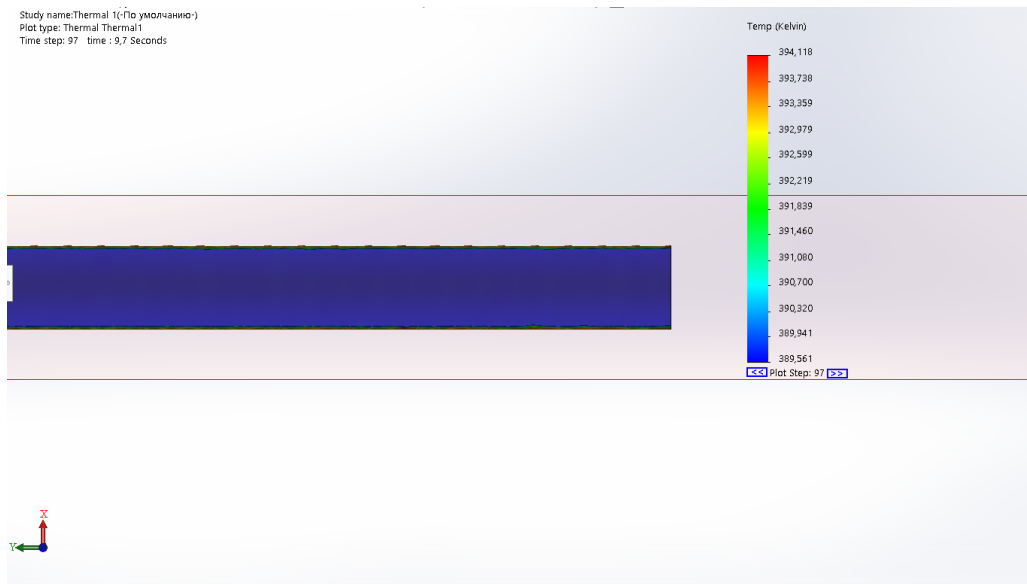


Рис. 7 Температурний градієнт гладкої труби

При візуальному аналізі робимо висновок про нерівномірність нагріву зовнішньої поверхні, що, в свою чергу, сприяє сповільненню теплопередачі до розчину.

На збільшеному зображенні переріза труби фіксуємо максимальну – 121 °C та мінімальну – 116 °C температури поверхонь . Також встановлюємо різницю температур зовні та зсередини профілю, що буде ріною 4 °C (рис. 8).

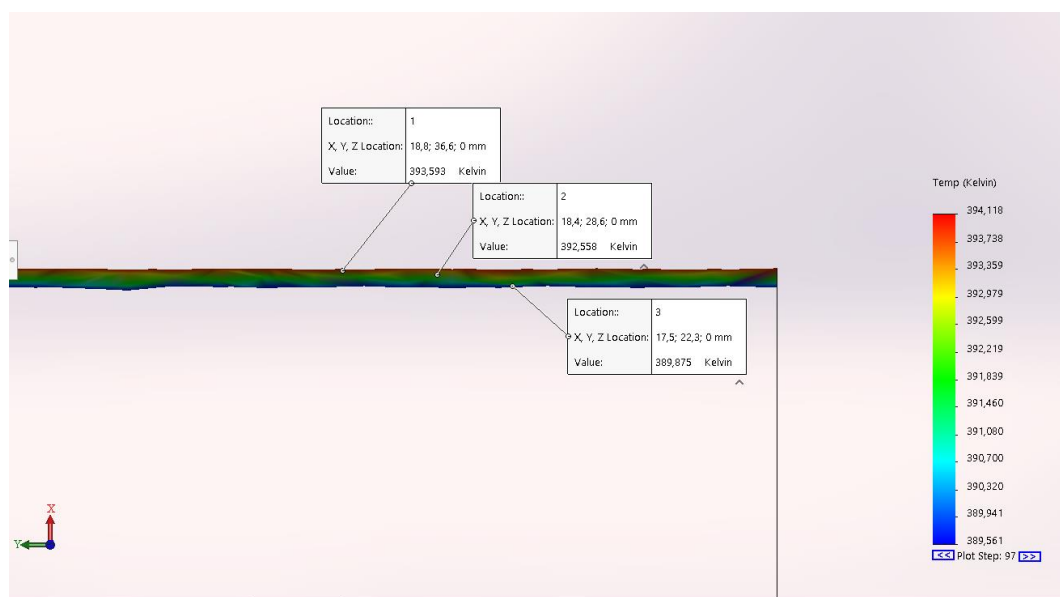


Рис. 8 Температурний градієнт гладкої труби

На рисунку 9 зазначаємо особливості траєкторії потоків гарячого теплоносія. Спостерігається характер руху без явних завихрень. Відповідно в таких умовах на нагрівання поверхні буде витрачатися більша кількість часу, що не може бути економічно вигідним варіантом.

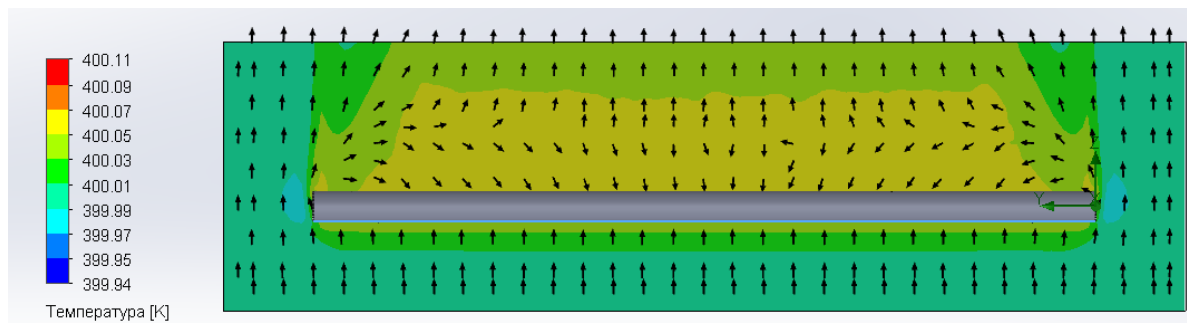


Рис. 9 Вектори руху гарячого теплоносія ззовні поверхні гладкої труби

Далі розглянемо запропоновану спіральний відбивач в гріючій камері (рис. 10).

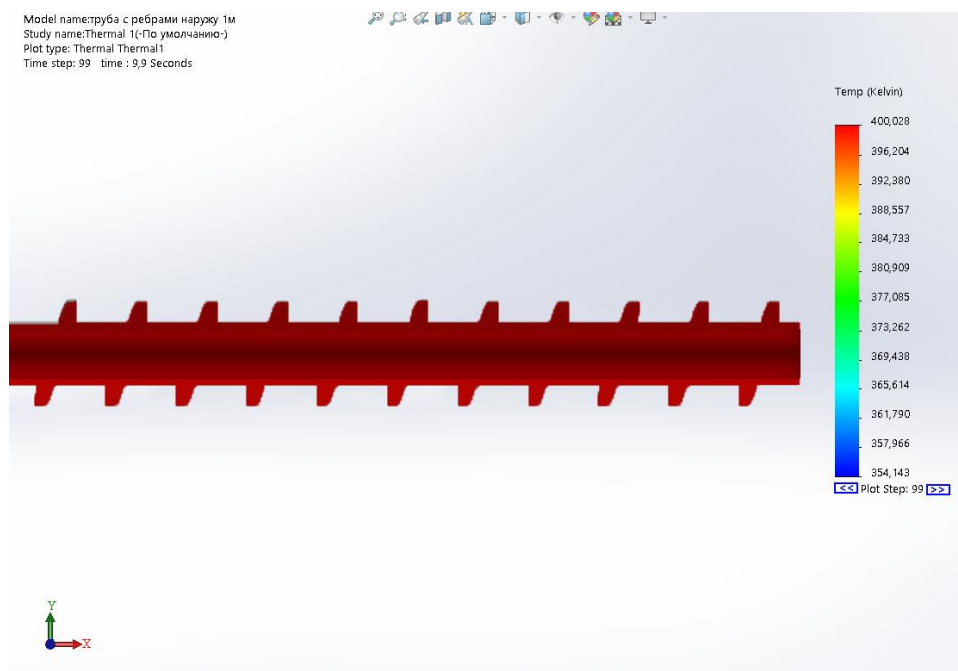


Рис. 10 Температурний градієнт спірального відбивача

Візуально аналізуючи отримані результати можна стверджувати, що по всій поверхні перерізу відносно сталий показник рівний 129 °C (рис. 11).

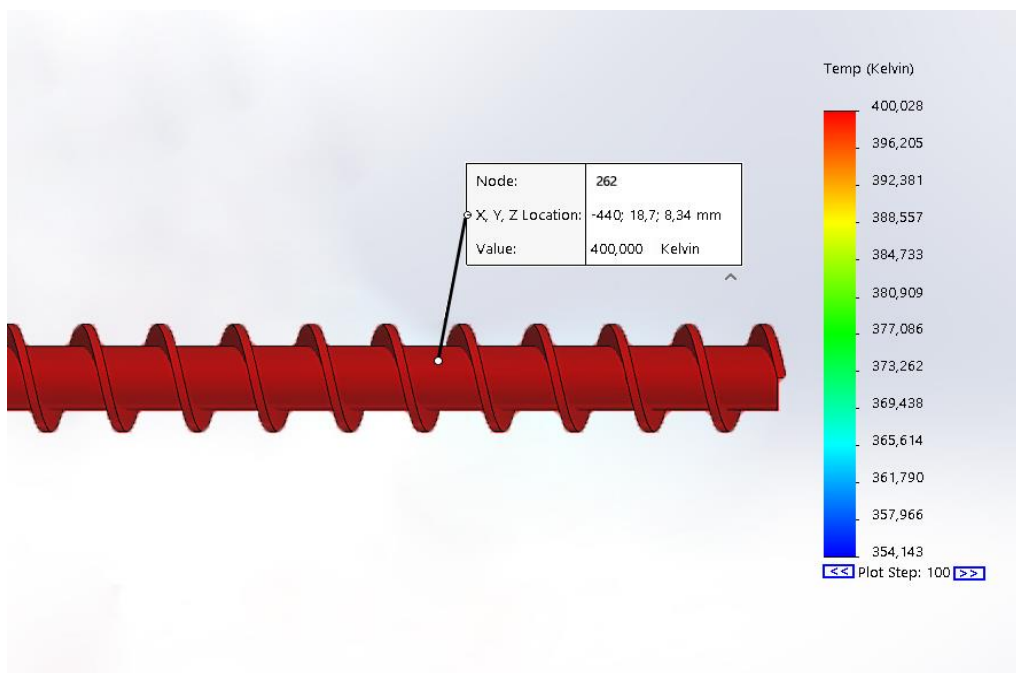


Рис. 11 Температурний градієнт спірального відбивача

Отже, відмічаємо рівномірний температурний розподіл за рахунок наявності завихрень (рис. 12), відповідно будемо мати менший показник затраченого часу на передачу теплоти розчину [19]. Різниця температур зовнішньої та внутрішньої поверхні менше 4 °C.

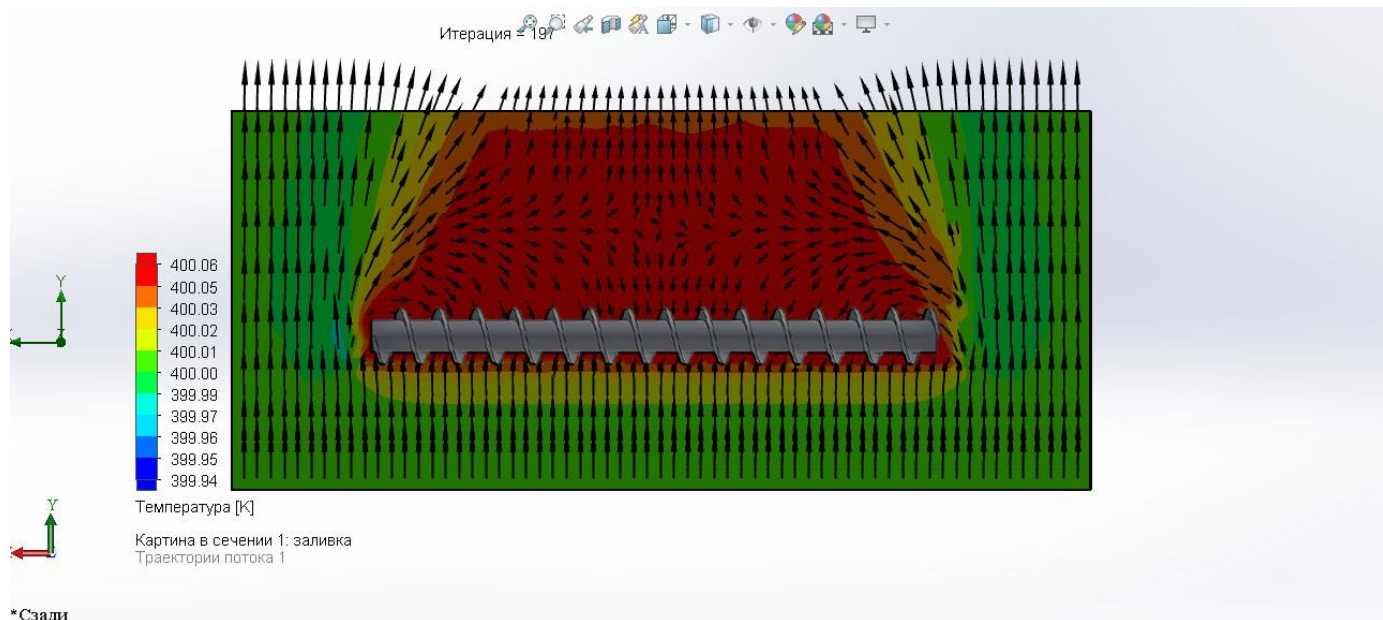


Рис. 12 Вектори руху гарячого теплоносія ззовні поверхні спірального відбивача

3.2 Висновки

Результати, що були отримані, демонструють доцільність застосування спіральний відбивач в гріючій камері випарного апарату. Порівнюючи представлені моделі, зокрема, показники температури всередині труб, було зафіксовано у гладкій трубі $116\text{ }^{\circ}\text{C}$ а в оребреній – $129\text{ }^{\circ}\text{C}$. Відповідно різниця складає $13\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Рівномірний розподіл температур, як наслідок, дозволяє зменшити час на процес передачі теплоти розчину всередині труби, що вирішує питання загальних енергозатрат.

Отже, ефективність спіралі підтверджена.

3.3 Основи методу скінчених елементів

Популярний на той час метод скінченних різниць, який також претендував на універсальність методу граничних елементів (граничних інтегральних рівнів), зараз займає досить вузькі ніші, обмежені дослідженнями чи спеціальними завданнями. MSE зайняв лідируючі позиції завдяки

моделюванню широкого кола об'єктів і явищ. За допомогою MSE можна розрахувати абсолютно повноцінні конструктивні елементи, вузли і конструкції, виготовлені з найрізноманітніших матеріалів різної природи. При цьому, звичайно, необхідно отримати умовності і похибки, неминучі в будь-якому наближенні. Тому питання відповідності розрахункової моделі реальності є, мабуть, головним при використанні програмного аналізу. перевірте, чи такі програми мають більш-менш детальну документацію, вони все ще є певною мірою чорними ящиками. Це означає певну непередбачуваність результатів, а також певну довільність їх трактування. Тому якість висновків, зроблених за результатами, залежить від кваліфікації, а також, щодо розрахунку міцності, від базового знання основ MSE [7].

Метод скінченних елементів — це чисельний метод розв'язання диференціальних рівнів, який існує у фізиці та техніці. Поява цього методу пов'язана з вирішенням завдань космічних досліджень (1950). Вперше він був опублікований у Turner, Cluj, Martin and Torpp. Ця робота сприяла іншим роботам; опубліковано ряд статей із застосуванням методу скінченних елементів до проблем будівельної механіки та механіки суцільних середовищ. Важливий внесок у теоретичну розробку методу зробив у 1963 році Мелощ, який показав, що метод скінченних елементів можна розглядати як один із варіантів відомого методу Релея-Рітца. У будівельній механіці метод скінченних елементів ефективною мінімізації енергії дозволяє звести задачу до системи лінійних рівнів рівноваги.

Зв'язок методу скін-елементів з процедурою мінімізації призвів до його широкого використання при вирішенні задач в інших техніках. Метод застосовувався до задач, що описуються рівняннями Лапласа або Пуассона. Рішення цих рівнів також пов'язане з мінімізацією деяких функціональних можливостей. У перших публікаціях теплові захворювання вирішувалися методом шкірних елементів. Потім метод був застосований до задач гідромеханіки, зокрема до задачі течії рідини в пористому середовищі.

Область застосування методу кінцевих елементів значно розширилася, коли було показано, що рівень вивільнених елементів у задачах будівельної

механіки, теплового розширення та гідромеханіки можна легко отримати за допомогою таких варіантів методу зважених розривів, як Галоріуш метод або метод найменших квадратів.

Метод скінченних елементів із чисельної процедури розв'язування задач будівельної механіки перетворився на загальний метод чисельного розв'язування диференціального рівня або системи диференціального рівня.

3.4 Побудова 3D моделі та конструктивний розрахунок

Розрахунковий метод полягає у визначенні товщини стінок елементів конструкції та перевірці їх міцності.

Оскільки цей пристрій можна замінити в різних галузях промисловості і в різних режимах роботи, при проектуванні необхідно вказати певний запас міцності.

У пакеті Solidworks розроблено конструкцію випарника з виносною камерою нагріву з використанням матеріалів з реальними фізичними властивостями, а елементи конструкції досліджено на міцність і стабільність.

3D модель побудована з реальними габаритними розмірами і максимальною деталізацією всіх елементів і деталей. Для виконання конструктивного розрахунку були використані реальні параметри матеріалів, з яких побудована конструкція, дані про процеси, що відбуваються в середині апарату.

Дана модель побудована таким чином, щоб можна було максимально точно відобразити робочі параметри цього пристрою і всі нотатки, які отримує конструкція під час реальної роботи..

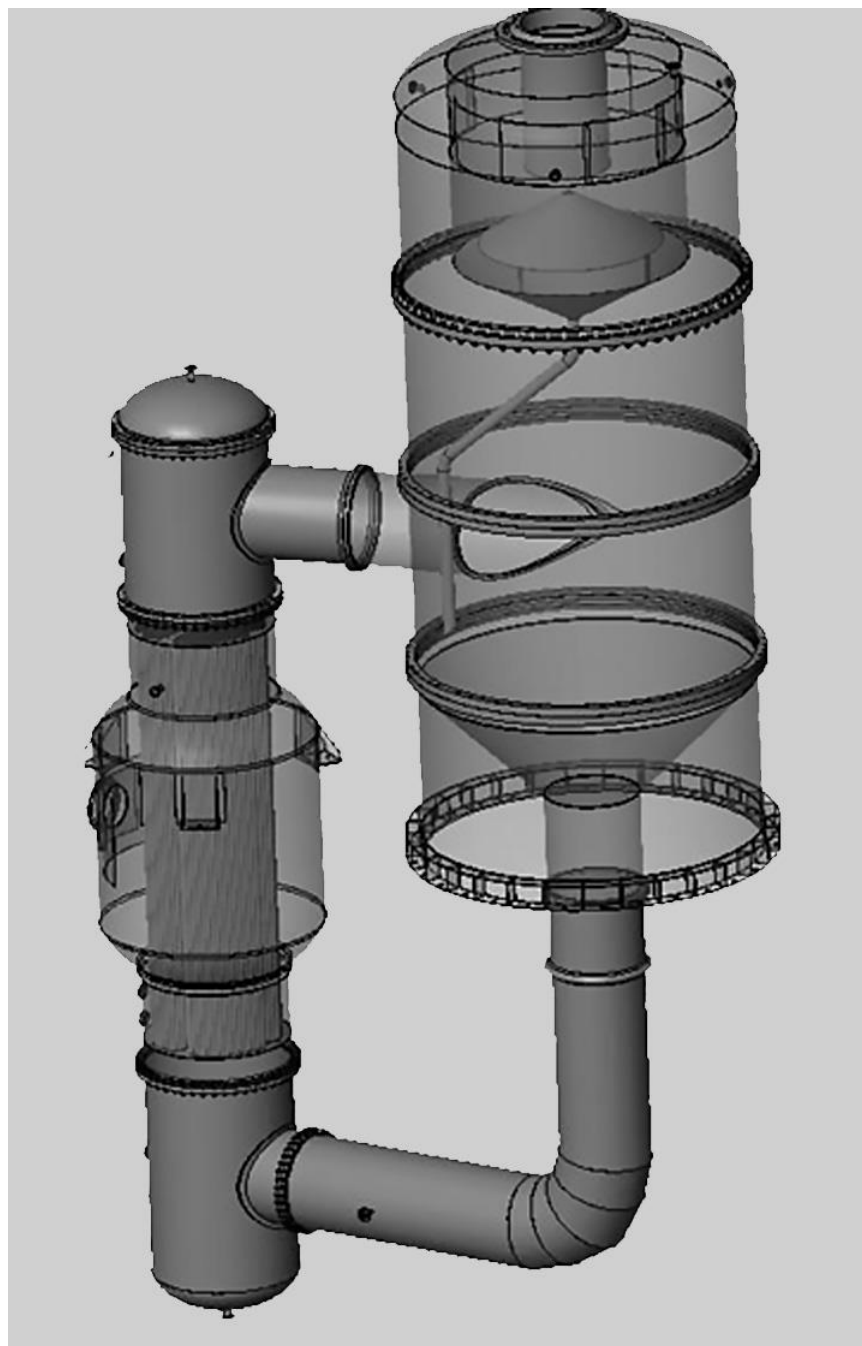


Рис. 3.1 – 3D модель випарного апарату з виносною
гріючою камерою

Вихідні дані для розрахунку на міцність та стійкість

1. Тиск, МПа:

у сепараторі	0,08
у міжтрубному просторі	0,4
у трубному просторі	0,1

2. Температура, С°:

у сепараторі	94
у міжтрубному просторі	144
у трубному просторі	102

3. Маса, кг: 15000

4. Корпус апарату та деталі, що контактують з розчином, який упарюється виготовляти із сталі 1X21H5T ГОСТ 5632-72;

опори - зі сталі 45X ГОСТ 4543-71,

інші деталі - зі сталі 3 ДСТУ 2651:2005.

Розглянемо розрахунки на міцність та стійкість ключових елементів таких як еліптична кришка сепаратору і гріючої камери, корпус гріючої камери, царга та опора сепаратора.

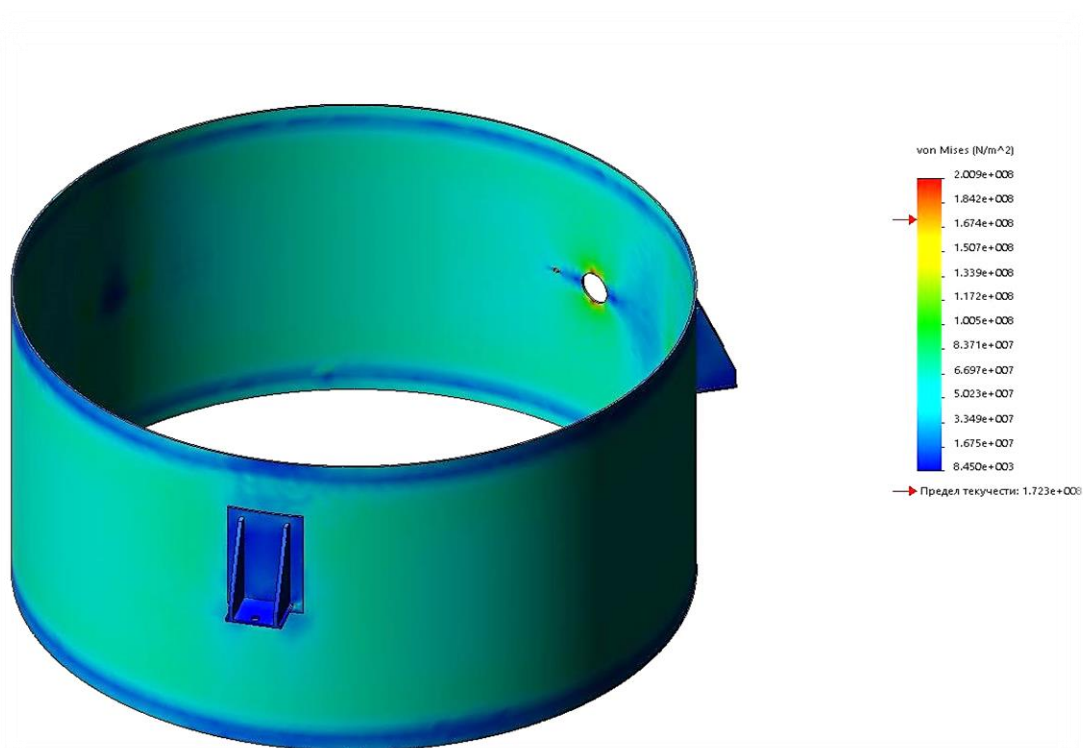


Рис. 3.2 – Верхня царга сепаратора, епюра напружень.

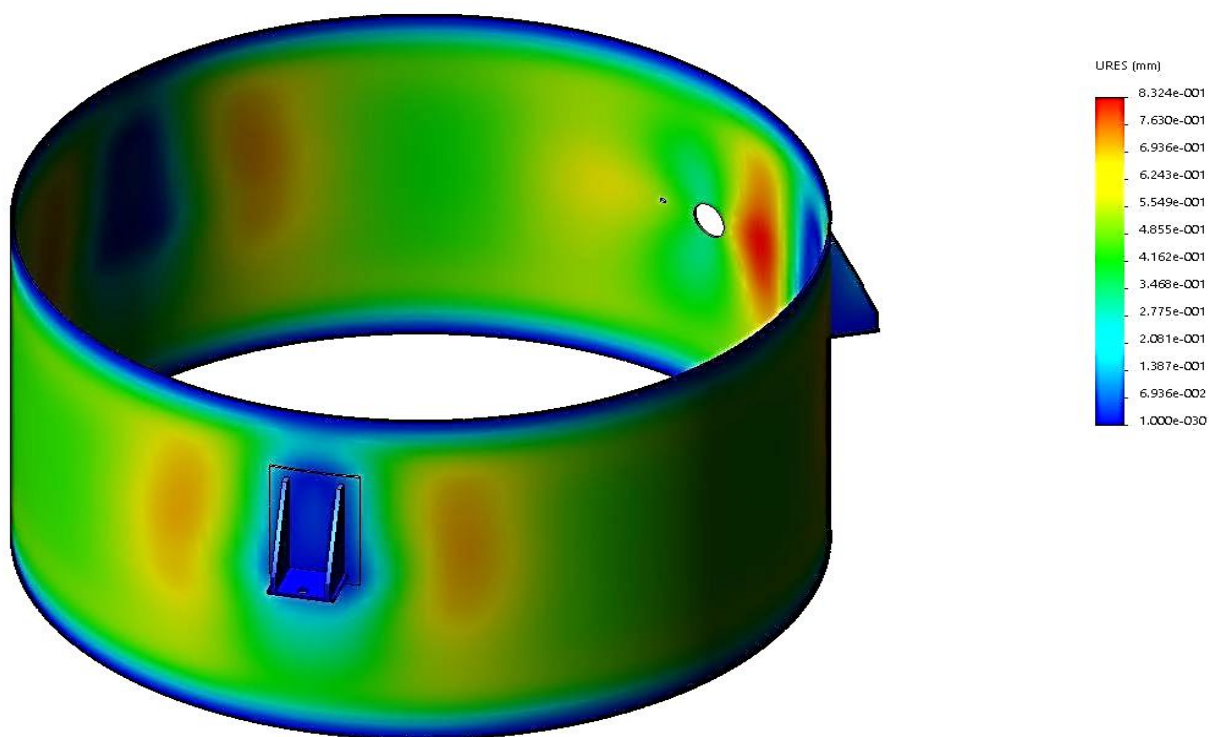


Рис. 3.3. – Верхня царга сепаратора, епюра деформацій.

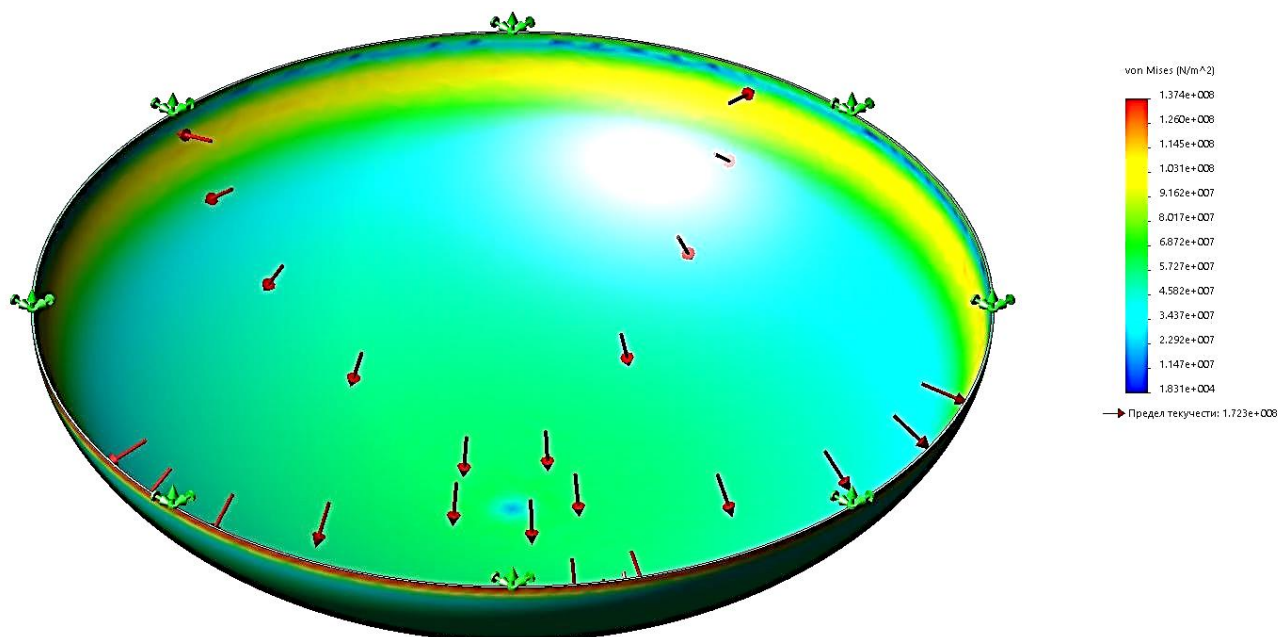


Рис. 3.4 – Еліптична кришка грійучої камери, епюра напружень.

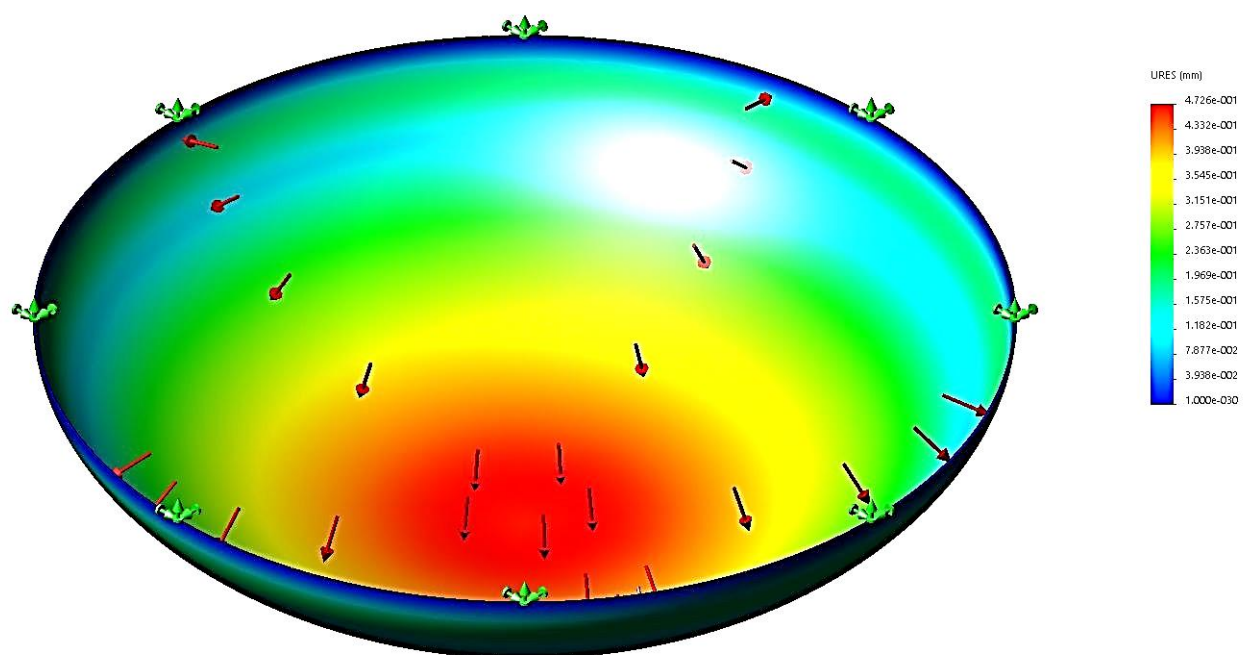


Рис. 3.5 – Еліптична кришка грійучої камери, епюра деформацій.

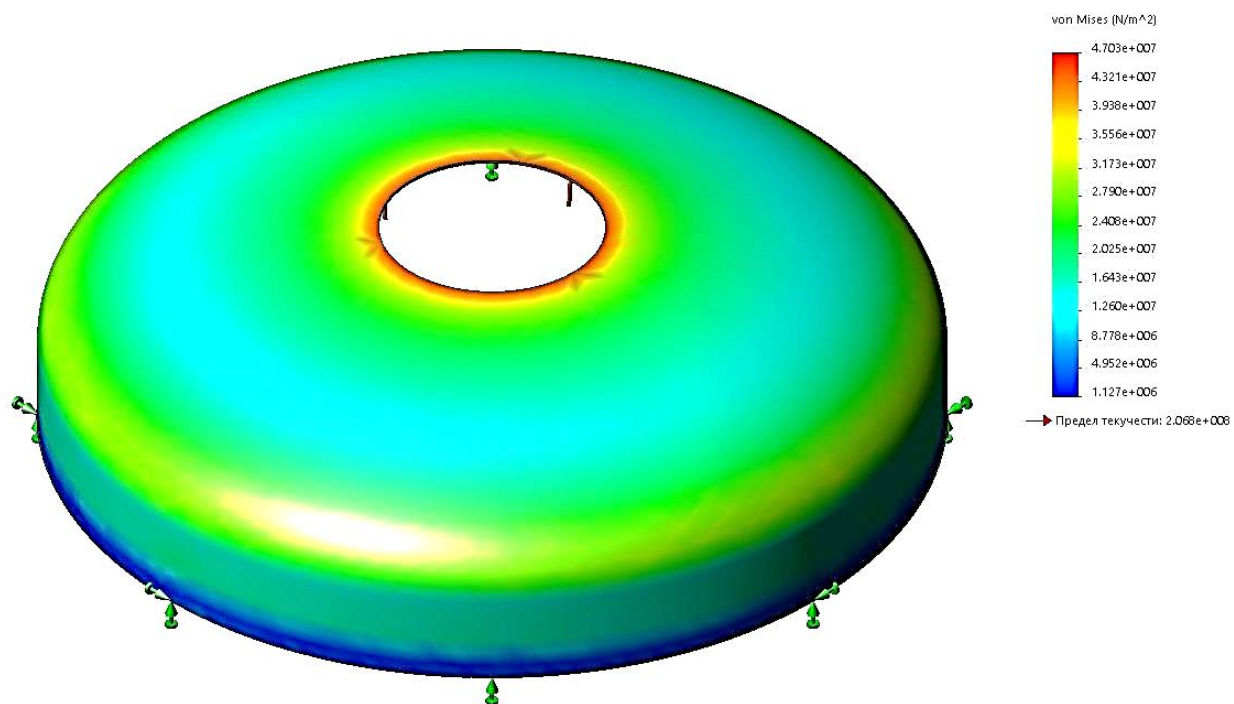


Рис. 3.6 – Еліптична кришка сепаратора, епюра
напружень.

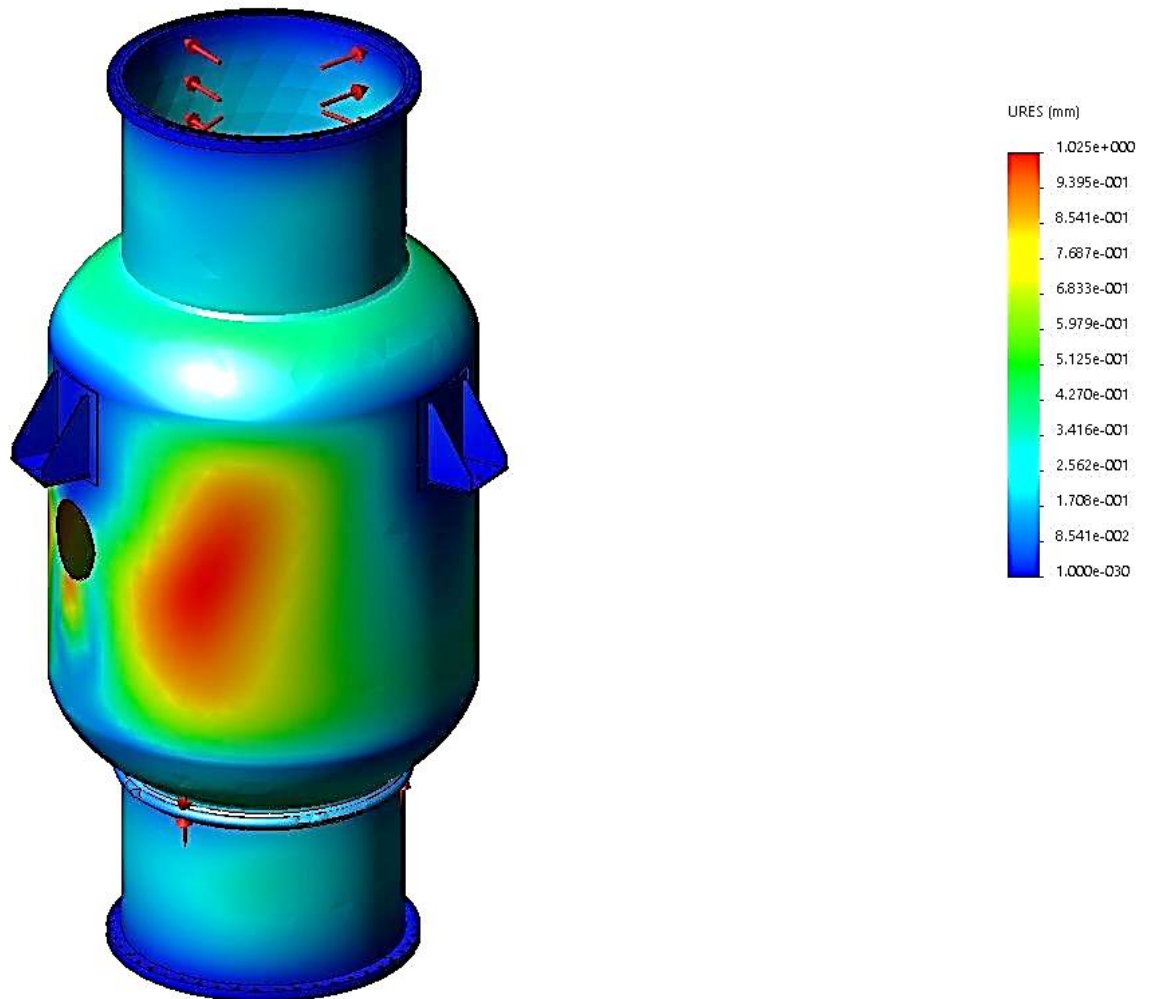


Рис. 3.9 – Корпус гріючої камери, епюра деформацій

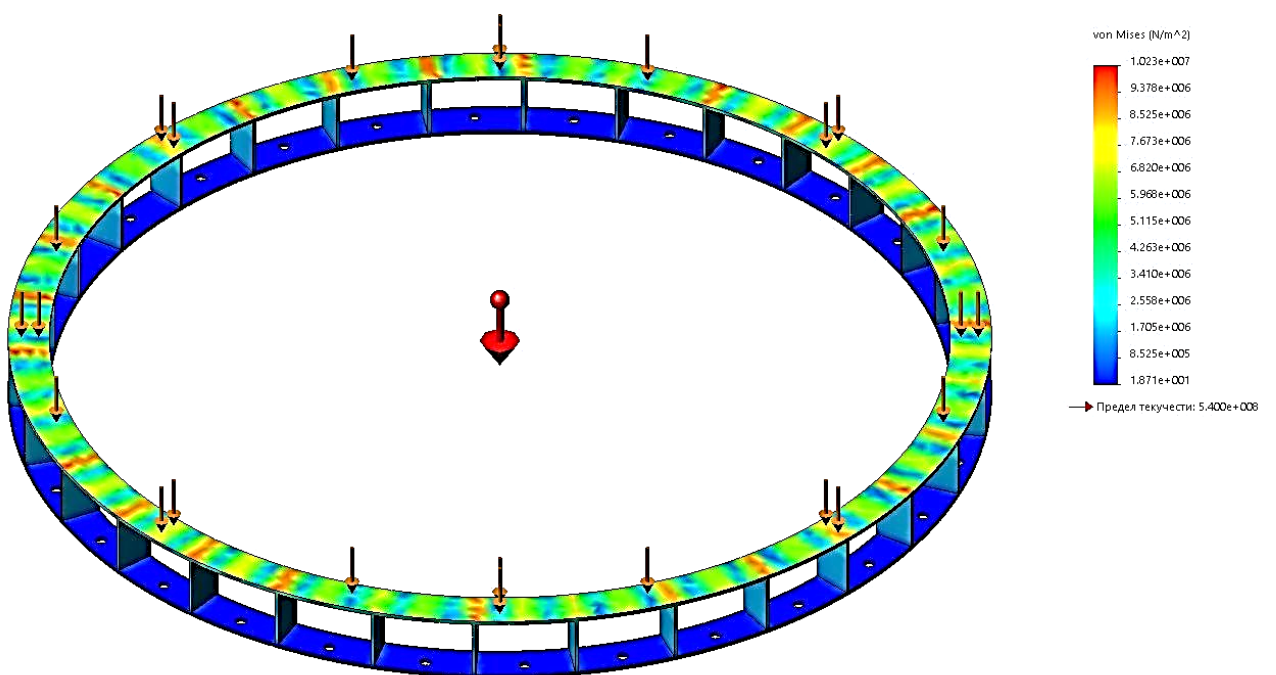


Рис. 3.10 – Опора сепаратора, епюра напружень

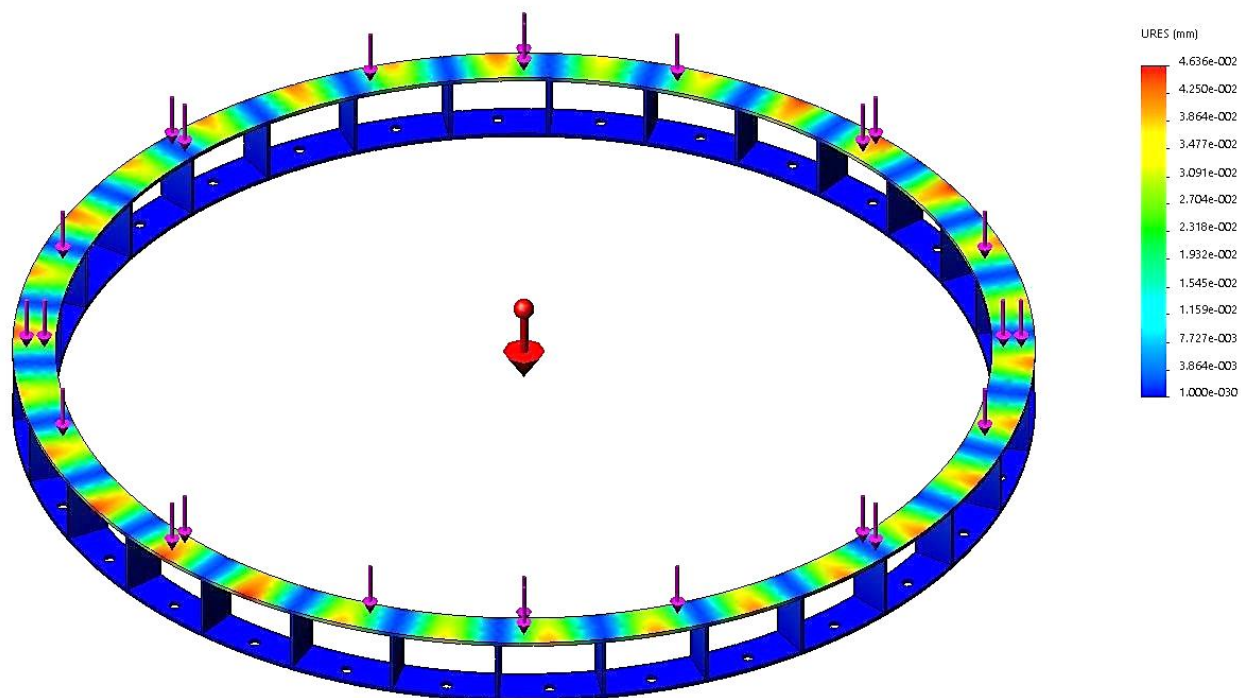


Рис. 3.11 – Опора сепаратора, епюра деформацій

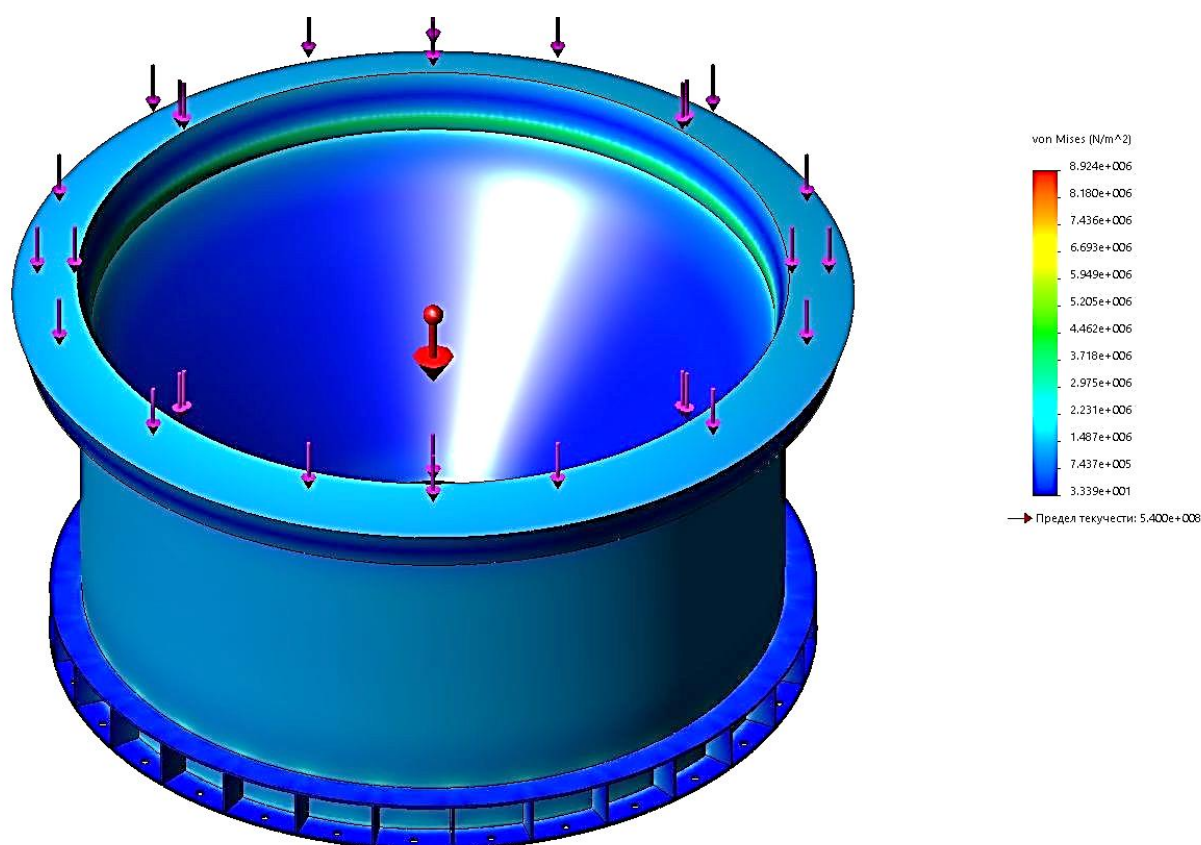


Рис. 3.12 – Опора сепаратора у зварному з'єднанні з днищем сепаратора , епюра напружень

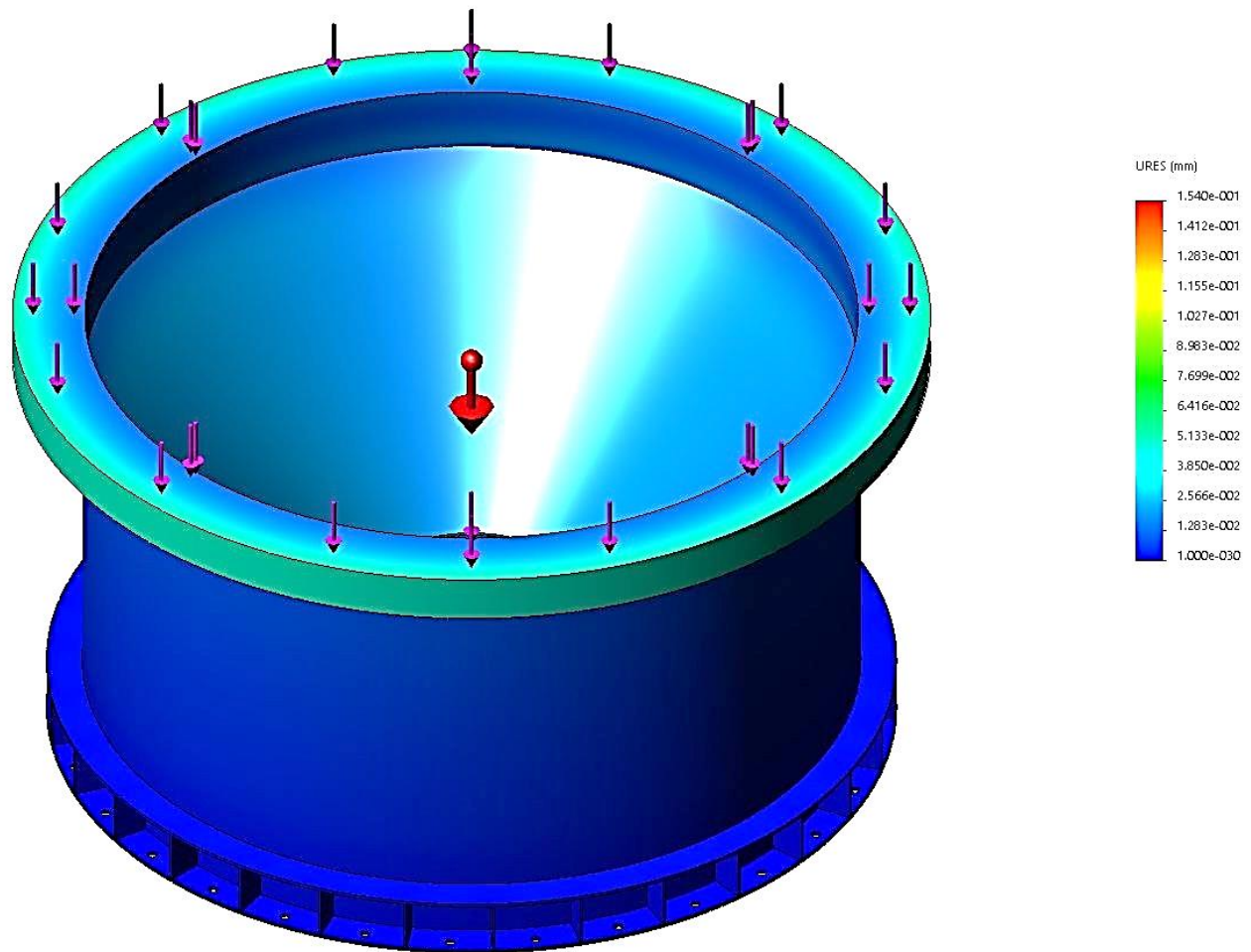


Рис. 3.13 – Опора сепаратора у зварному з'єднанні з дном сепаратора, епюрадеформацій

На Рис. 3.2 зображена епюра напружень верхньої царги сепаратора. Максимальне напруження конструктивного елемента досягається в синіх зонах і становить $0,023 \cdot 10^{-7} \text{Па}$, але також існує точка на елементі, напруження якої досягає червоної зони і становить, $1,842 \cdot 10^{-8} \text{Па}$. Дана точка не є проблемою, так як відноситься до периметру отвору у якому розташовується герметичний оглядовий люк, при встановленні якого утворює додаткове цільце жосткості для даного отвору, тим самим зменшує на нього навантаження до максимально малого значення.

На Рис. 3.3 зображена епюра деформацій верхньої царги сепаратора. Максимальна деформація конструктивного елемента досягається в червоних зонах і становить $7,63 \cdot 10^{-1} \text{мм}$.

На Рис. 3.4 зображена епюра напружень еліптичної кришки гріючої камери. Максимальне напруження конструктивного елемента досягається в жовтих зонах і становить $1,031 \cdot 10^{-8} \text{Па}$.

На Рис. 3.5 зображена епюра деформацій еліптичної кришки гріючої камери. Максимальна деформація конструктивного елемента досягається в червоних зонах і становить $4,726 \cdot 10^{-1} \text{мм}$.

На Рис. 3.6 зображена епюра напружень еліптичної кришки сепаратора. Максимальне напруження конструктивного елемента досягається в помаранчевій зоні і становить $3,938 \cdot 10^{-7} \text{Па}$.

На Рис. 3.7 зображена епюра деформацій еліптичної кришки сепаратора. Максимальна деформація конструктивного елемента досягається в червоних зонах і становить $11,70 \cdot 10^{-1} \text{мм}$.

На Рис. 3.8 зображена епюра напружень корпусу гріючої камери. Максимальне напруження конструктивного елемента досягається в блакитних зонах і становить $7,317 \cdot 10^{-7} \text{Па}$.

На Рис. 3.9 зображена епюра деформацій корпусу гріючої камери. Максимальна деформація конструктивного елемента досягається в червоних зонах і становить $10,25 \cdot 10^{-1} \text{мм}$.

На Рис. 3.10 зображена епюра напружень опора сепаратора. Максимальне напруження конструктивного елемента досягається в червоних зонах і становить $1,023 \cdot 10^{-7} \text{Па}$.

На Рис. 3.11 зображена епюра деформацій опора сепаратора. Максимальна деформація конструктивного елемента досягається в помаранчевій зоні і становить $4,250 \cdot 10^{-2} \text{мм}$.

На Рис. 3.12 зображена епюра напружень опора сепаратора у зварному з'єднанні з днищем сепаратора. Максимальне напруження конструктивного елемента досягається в зелених зонах і становить $3,718 \cdot 10^{-6} \text{Па}$.

На Рис. 3.13 зображена епюра деформацій опора сепаратора у зварному з'єднанні з днищем сепаратора. Максимальна деформація конструктивного елемента досягається в блакитній зоні і становить $3,850 \cdot 10^{-2} \text{мм}$.

3.5 Висновки

З отриманих результатів можна побачити, що при заданих навантаженнях втрат міцності немає і деформації конструктивних елементів мінімальні.

4. ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ РОЗРОБЛЕНОЇ КОНСТРУКЦІЇ

4.1 Обґрунтування вибору конструкції випарного апарату

Концентрування розчину ітаконової кислоти, отриманої глибинним способом є досить складним процесом. Складність його полягає в тому, що у процесі випарювання випадає нерозчинний гіпс [2], тому можна використовувати не будь-яку конструкцію випарного апарата.

Для випарювання ітаконової кислоти застосовують апарат з природною циркуляцією та виносною гріючою камерою [2, 12, 13].

Цю конструкцію рекомендовано використовувати на даному виробництві тому, що: конструкцію можна швидко розібрати та зібрати [12]; осад можна видаляти механічним способом [2]; має місце легкий доступ до внутрішньої поверхні гріючих труб: забезпечується висока швидкість процесу випарювання [12].

4.1.1 Опис конструкції випарного апарату

Схема випарного апарату з виносною гріючою камерою зображена на рисунку 4.1. Основними його складовими є гріюча камера та сепаратор. Гріюча камера випарного апарату складається з корпусу 1 з'єднаного за допомогою фланцевого з'єднання з днищем 2 та царгою 3, до якої в свою чергу, приєдніється кришка 4. Сепаратор апарату складається з двох царг 5 і 7, з'єднаних між собою. До нижньої царги прикріплюється днище 6, а до верхньої – кришка 8. Сепаратор і гріюча камера з'єднуються між собою циркуляційною трубою 9.

Гріюча камера встановлена на трьох вертикальних опорах типу «лапа». Сепаратор – на циліндричній опорі, з'єднаний з днищем, та трьох опорах типу «лапа», що запобігають усуненню горизонтальних зміщень апарату (це зв'язано з великими габаритними розмірами апарату). Усі опори до корпусу приварюються.

4.1.2 Вибір матеріалів для виготовлення випарного апарату

Вибір матеріалів для виготовлення будь-якого апарату залежить від технологічного процесу, що в ньому відбувається. До основних чинників, що впливають на вибір матеріалу, відносяться середовище, що міститься в апараті, тиск і температура [11]. Конструктивний матеріал повинен бути стійким до дії агресивних середовищ та корозії різних видів, мати достатню механічну міцність та стійкість, легко зварюватися, та забезпечувати надійність зварних з'єднань [20], а також виключати його взаємодію з середовищем, що міститься в апараті.

Основним критерієм при виборі матеріалу для виготовлення випарного апарату є середовище в ньому. Обраний матеріал повинен бути хімічно стійким під час контакту з розчином ітаконової кислоти. Найбільш відповідає даним вимогам аустенітна сталь марки 1X21H5T [8]. Швидкість її корозії складає не більше 0,1 мм/рік. Із цієї сталі виготовляють корпус апарату, гріючі труби, трубну решітку, фланці та штуцера апарату, а також усі інші деталі, що контактують з розчином ітаконової кислоти. Кріпильні елементи (болти, гайки) виконуються із сталі марки Ст3 [9], опори – із сталі марки 45Х [10], для виготовлення прокладок використовують пароніт [11].

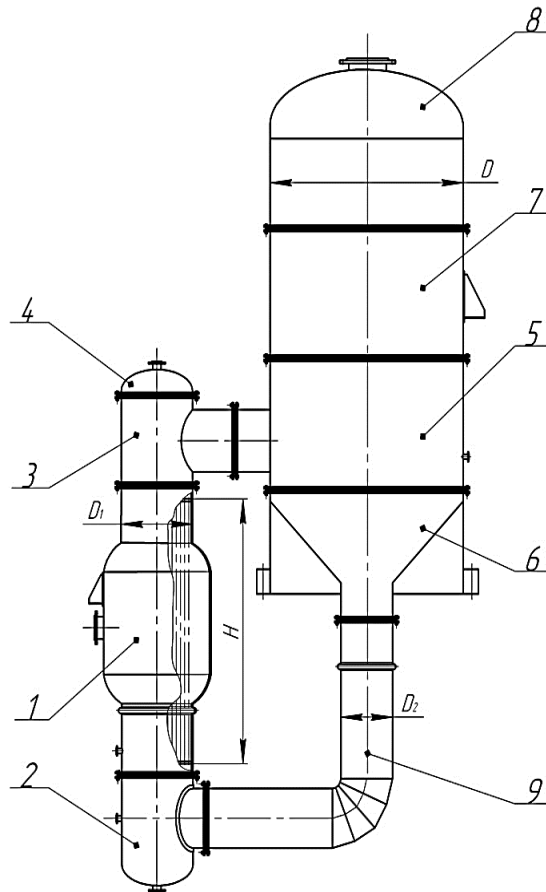


Рисунок 4.1 – Схема випарного апарату з виносною гріючою камерою:

- 1 – корпус гріючої камери; 2 – днище гріючої камери; 3 – царга гріючої камери;
 4 – кришка гріючої камери; 5 – нижня царга сепаратора; 6 – днище сепаратора;
 7 – верхня царга сепаратора; 8 – кришка сепаратора; 9 – циркуляційна труба

4.2 Технічна характеристика випарного апарату

1. Апарат, призначений для упарювання розчину ітаконової кислоти.

2. Концентрація розчину, % (мас):

початкова	15
кінцева	65

3. Продуктивність, кг/с:

по вихідному продукту	2,89
по кінцевому продукту	0,667
по випареній волозі	2,223

4. Площа поверхні теплообміну, м²: 250

5. Середовище у апараті:

у сепараторі	розчин ітаконової кислоти, водяна пара
у міжтрубному просторі	насичена водяна пара
у трубному просторі	розчин ітаконової кислоти

6. Тиск, МПа:

у сепараторі	0,08
у міжтрубному просторі	0,4
у трубному просторі	0,1

7. Температура, С°:

у сепараторі	94
у міжтрубному просторі	144
у трубному просторі	102

8. Габаритні розміри, мм:

довжина	7490
ширина	3520
висота	13500

9. Маса, кг: 15000

4.3 Розрахунки, що підтверджують працездатність та надійність конструкції випарного апарату

4.3.1 Технологічний розрахунок випарного апарату

Вихідні дані:

- початкова масова витрата розчину ітаконової кислоти
 $G_n = 2,89 \text{ кг/с};$
- абсолютний тиск пари у сепараторі $p_1 = 0,08 \text{ МПа};$
- початкова концентрація розчину ітаконової кислоти $a_n = 15 \text{ \%};$
- кінцева концентрація розчину ітаконової кислоти $a_k = 65 \text{ \%};$
- початкова температура розчину ітаконової кислоти $t_n = 80 \text{ }^\circ\text{C};$
- абсолютний тиск гріючої пари $p_{zn} = 0,4 \text{ МПа};$
- вологовміст гріючої пари $\varphi = 3 \text{ \%}.$

Співвідношення температур у апараті описується рівнянням [23]:

$$t_{zn} > t_{kun} > t_k > t_1 > t_0. \quad (52)$$

Температура вторинної пари у сепараторі випарного апарату t_1 визначається як температура насичення при тиску p_1 [23]. У відповідності до [24] $t_1 = 93,52 \text{ }^\circ\text{C}$. З іншого боку:

$$t_1 = t_0 + \Delta t_{zd}, \quad (53)$$

де t_0 – температура вторинної пари в барометричному конденсаторі (визначається як температура насичення при тиску p_0); Δt_{zd} – гідравлічна депресія (зміна температури вторинної пари на ділянці сепаратору (барометричний конденсатор), викликана перепадом тиску пари, який виникає в результаті перепаду гідравлічного опору в паропроводі вторинної пари). Згідно з [23] приймаємо $\Delta t_{zd} = 1,5 \text{ }^\circ\text{C}$.

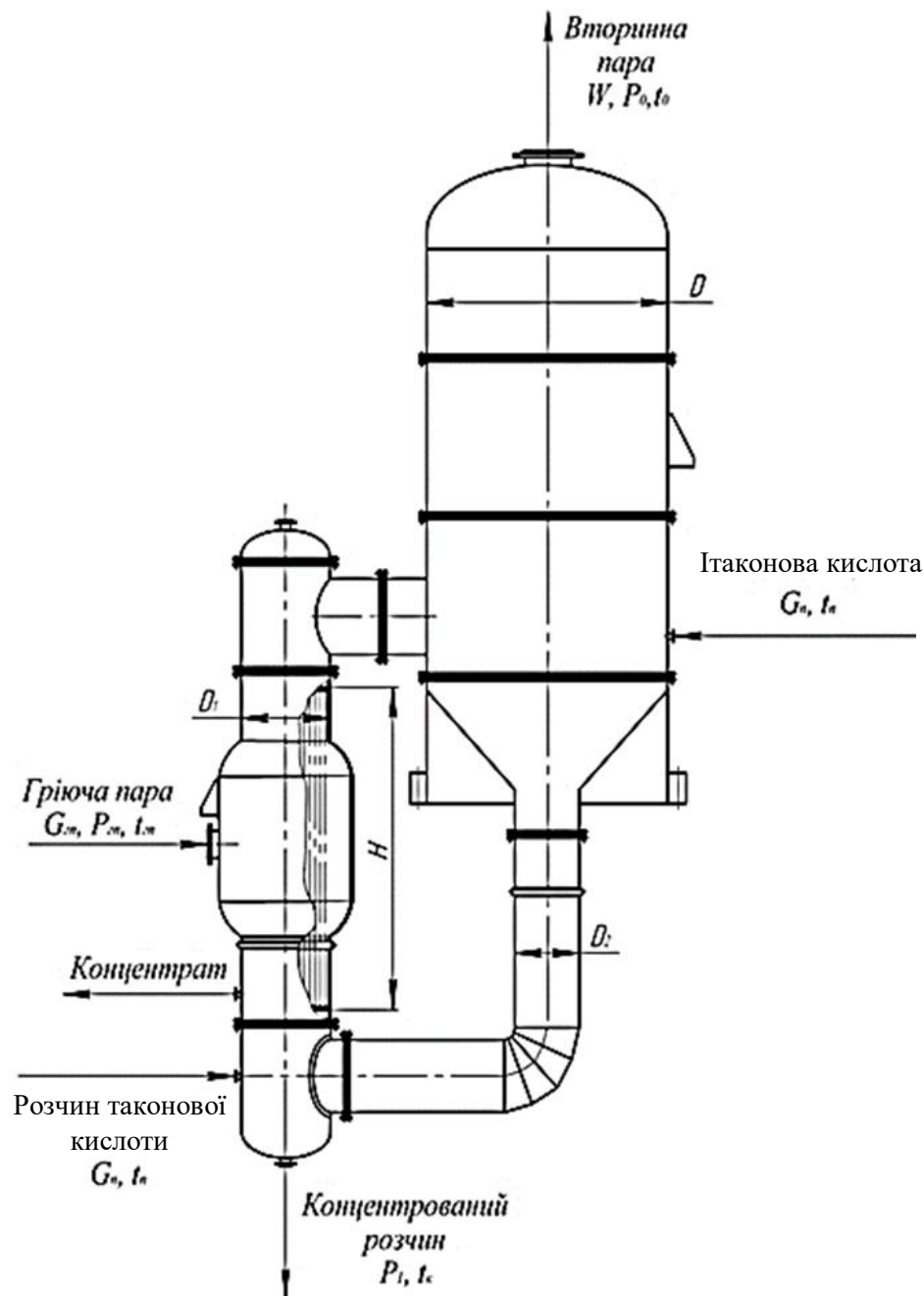


Рисунок 4.1 – Розрахункова схема вакуум-випарного апарату з природною циркуляцією

З рівняння (53) температура пари в барометричному конденсаторі:

$$t_0 = t_1 - \Delta t_{\text{до}} = 92,42 - 2,3 = 90,12 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Температура кипіння розчину в сепараторі випарного апарату, при якій упарений розчин виводиться з апарату [23]:

$$t_{\kappa} = t_1 + \Delta t_{\text{деп}} , \quad (54)$$

де $\Delta t_{\text{депр}}$ – температурна депресія, що виражає підвищення температури розчину в порівнянні з температурою кипіння чистого розчинника (води) при тому ж тиску.

$$\Delta t_{\text{депр}} = \frac{T_1^2}{16,2 \cdot \frac{1}{r_1}} \cdot \Delta^{атм}, \quad (55)$$

де T_1 , r_1 – температура кипіння і теплота пароутворення для води при тиску p_1 : $T_1 = t_1 + 273 = 93,52 + 273 = 366,52^\circ\text{C}$, $r_1 = 2273 \text{ кДж/кг}$ [24]; $\Delta^{атм}$ – температурна депресія при атмосферному тиску.

Температура кипіння розчину ітаконової кислоти при концентрації $a_k = 65\%$ становить: $t_{\text{кип.л.к.}} = 102,46^\circ\text{C}$ [2]. Температура кипіння води при атмосферному тиску $t_{\text{кип.води}} = 100^\circ\text{C}$.

$$\Delta^{атм} = t_{\text{кип.л.к.}} - t_{\text{кип.води}} = 102,46 - 100 = 2,46^\circ\text{C}.$$

Підставимо отримане значення в (55) і отримаємо:

$$\Delta t_{\text{депр}} = 16,2 \cdot \frac{366,52^2}{2273 \cdot 10^3} \cdot 2,46 = 2,35^\circ\text{C};$$

тоді (54) набуде значення:

$$t_k = 93,52 + 4,335 = 97,875^\circ\text{C}.$$

Середня температура кипіння розчину в трубах [23]:

$$t_{\text{кин}} = t_k + \Delta t_{\text{гс}}, \quad (56)$$

де $\Delta t_{\text{гс}}$ – гідростатична депресія (підвищення температури кипіння розчину внаслідок гідростатичного тиску, що виникає за рахунок тиску шару рідини в апараті) [23]:

$$\Delta t_{\text{гс}} = t_{\text{ср}} - t_1, \quad (57)$$

де $t_{\text{ср}}$ – температура кипіння води при середньому тиску розчину в трубах випарного апарату $p_{\text{ср}}$:

$$p_{\text{ср}} = p_1 + 0,5 \cdot \rho_p \cdot g \cdot H_p, \quad (58)$$

де ρ_p – густина розчину при $t'_{\text{кин}} \approx 107^\circ\text{C}$ [23] (одбирається довільно з урахуванням, що $t_{\text{кин}} > t_k$):

$$\rho'_p = (1,01 + 0,47 \cdot a_\kappa) \cdot 10^3 - 0,51 \cdot t'_{кин} = \\ = (1,01 + 0,47 \cdot 0,45) \cdot 10^3 - 0,51 \cdot 103 = 1260,9 \text{ кг/м}^3.$$

де H_p – оптимальна висота рівня в гріючих трубах [23]:

$$H_p = [0,26 + 0,014 \cdot (\rho'_p - \rho_{в.кин})] \cdot H_{mp}, \quad (59)$$

де H_{mp} – робоча висота труб: $H_{mp} = 4000 \text{ мм}$ [8]; $\rho_{в.кин}$ – густина води при $t'_{кин}$: $\rho_{в.кин} = 953,1 \text{ кг/м}^3$ [16]. Підставимо знайдені значення в (59) і отримаємо:

$$H_p = [0,26 + 0,0014 \cdot (1260,93 - 953,1)] \cdot 4 = 2,76 \text{ м.}$$

За (58) середній тиск рідини в трубах:

$$p_{cp} = 0,8 \cdot 10^5 + 0,5 \cdot 1260,9 \cdot 9,81 \cdot 2,765 = 0,972 \cdot 10^5 \text{ Па.}$$

У відповідності до [24] $t_{cp} = 99,04 \text{ }^\circ\text{C}$, тоді за (57) гідростатична депресія:

$$\Delta t_{zd} = 99,02 - 93,55 = 5,52 \text{ }^\circ\text{C},$$

підставивши її в (56) отримаємо:

$$t_{кин} = 95,878 + 5,54 = 101,397 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Різниця між температурою конденсації гріючої пари t_{zn} і температурою конденсації вторинної пари у барометричному конденсаторі t_0 називається загальною різницею температур, яка визначається за формулою:

$$\Delta t_{заг} = t_{zn} - t_0. \quad (60)$$

де t_{zn} – температура гріючої пари при тиску p_{zn} . Відповідно до [24] $t_{zn} = 143,62 \text{ }^\circ\text{C}$, тоді формула (60) прийме значення:

$$\Delta t_{заг} = 143,62 - 92,02 = 51,6 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Різниця між температурою конденсації гріючої пари t_{zn} і температурою кипіння розчину $t_{кин}$ називається корисною різницею температур і визначається за формулою [23]:

$$\Delta t_{кор} = t_{zn} - t_{кин} = \Delta t_{заг} - (\Delta t_{zc} + \Delta t_{деп} + \Delta t_{zd}) = \\ = 51,6 - (1,5 + 2,355 + 5,52) = 42,225 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Матеріальний баланс у випарному апараті:

$$G_n = G_k + W ; \quad (61)$$

по абсолютно сухій речовині [25]:

$$G_n \cdot a_n = G_k \cdot a_k ; \quad (62)$$

кінцева масова витрата розчину ітаконової кислоти:

$$G_k = \frac{G_n \cdot a_n}{a_k} = \frac{2,89 \cdot 0,15}{0,65} = 0,667 \text{ кг/с.}$$

З (61) кількість випареної вологи:

$$W = G_n - G_k = 2,89 - 0,667 = 2,223 \text{ кг/с.}$$

Кількість теплоти, переданої від гріючої пари до киплячого розчину:

$$Q_{zn} = G_n \cdot c_{p,n} \cdot (t_k - t_n) + W \cdot (i_{en} - c_{p,e} \cdot t_k) + Q_{emp} , \quad (63)$$

де $c_{p,n}$ – теплоємність розчину ітаконової кислоти при початковій концентрації та температурі:

$$\begin{aligned} c_{p,n} &= (0,99 - 0,66 \cdot a_n + 0,001 \cdot t_n) \cdot 4,19 = \\ &= (0,99 - 0,66 \cdot 0,15 + 0,001 \cdot 80) \cdot 4,19 = 4,068 \cdot 10^3 \text{ Дж/кг К;} \end{aligned}$$

де i_{en} – питома ентальпія водяної пари при t_1 : $i_{en} = 2663 \cdot 10^3 \text{ Дж/кг}$ [24]; $c_{p,e}$ – теплоємність води при $t_{кин}$: $c_{p,e} = 4,23 \cdot 10^3 \text{ Дж/кг К}$ [17]; Q_{emp} – втрати теплоти в навколишнє середовище.

З урахуванням втрат рівняння (63) можна записати у вигляді [23]:

$$\begin{aligned} Q_{zn} &= 1,05 \cdot [G_n \cdot c_{p,n} \cdot (t_k - t_n) + W \cdot (i_{en} - c_{p,e} \cdot t_k)] = \\ &= 1,05 \cdot [2,89 \cdot 4,068 \cdot 10^3 (95,875 - 80) + \\ &+ 2,223 \cdot (2663 \cdot 10^3 - 4,23 \cdot 10^3 \cdot 95,875)] = 5,466 \cdot 10^6 \text{ Вт.} \end{aligned}$$

Витрата гріючої пари:

$$G_{zn} = \frac{Q_{zn}}{r_{zn} \cdot x} , \quad (64)$$

де r_{zn} – теплота пароутворення при p_{zn} : $r_{zn} = 2133 \cdot 10^3 \text{ Дж/кг}$; x – паровміст (ступінь сухості) гріючої пари:

$$x = 1 - \frac{\varphi}{100} = 1 - \frac{3}{100} = 0,97,$$

тоді з (64) масова витрата гріючої пари:

$$G_{zn} = \frac{5,466 \cdot 10^6}{2133 \cdot 10^3 \cdot 0,97} = 2,641 \text{ кг/с.}$$

Питома витрата гріючої пари:

$$d = \frac{G_{zn}}{W} = \frac{2,641}{2,223} = 1,188 \text{ кг/кг.}$$

У випадку конденсації водяної пари на стінках пучка n , вертикальних труб висотою H_{mp} середнє значення коефіцієнту тепловіддачі визначається за формулою [23]:

$$\alpha_1 = 1,21 \cdot \lambda_{\epsilon} \cdot \left(\frac{\rho_{\epsilon}^2 \cdot r_{zn} \cdot g}{\mu_{\epsilon} \cdot H_{mp}} \right)^{0,33} \cdot q^{-0,33} = A \cdot q^{-0,33}, \quad (65)$$

де усі константи визначаються при температурі конденсату $t_{конд} = t_{zn} = 143,62^\circ\text{C}$. Тоді, відповідно до [17]: $\lambda_{\epsilon} = 68,464 \cdot 10^{-2} \text{ Вт/м К}$, $\rho_{\epsilon} = 922,742 \text{ кг/м}^3$, $\mu_{\epsilon} = 0,192 \cdot 10^{-3} \text{ Па с}$.

Тоді, використовуючи (65), значення коефіцієнту A :

$$A = 1,21 \cdot \lambda_{\epsilon} \cdot \left(\frac{\rho_{\epsilon}^2 \cdot r_{zn} \cdot g}{\mu_{\epsilon} \cdot H_{mp}} \right)^{0,33} = 1,21 \cdot 68,464 \cdot 10^{-2} \times \\ \times \left(\frac{922,742^2 \cdot 2133 \cdot 10^3 \cdot 9,81}{0,192 \cdot 10^{-3} \cdot 5} \right)^{0,33} = 193583,741.$$

Коефіцієнт тепловіддачі для киплячого розчину знаходимо за формулою [23]:

$$\alpha_2 = b \cdot \left(\frac{\lambda_p^2 \cdot \rho_p}{\mu_p \cdot \sigma_p \cdot (t_{kun} + 273)} \right)^{0,33} \cdot q^{0,67} = B \cdot q^{0,67}, \quad (66)$$

де

$$b = 0,075 \cdot \left[1 + 10 \cdot \left(\frac{\rho_p}{\rho_{zn}} - 1 \right)^{-0,67} \right]. \quad (67)$$

Усі константи визначають при температурі кипіння розчину ітаконової кислоти у трубах $t_{кин} = 101,395^\circ\text{C}$, за формулами:

$$\begin{aligned} \rho_p &= (1,01 + 0,47 \cdot a_\kappa) \cdot 10^3 + 0,51 \cdot t_{кин} = (1,01 + 0,47 \cdot 0,65) \cdot 10^3 + \\ &+ 0,51 \cdot 101,395 = 1261,824 \text{ кг/м}^3; \\ \mu_p &= \exp \cdot \left(7,4 \cdot a_\kappa^{1,65} \cdot \frac{100}{100 + t_{кин}} \right) \cdot \mu'_e, \end{aligned} \quad (68)$$

де μ'_e – коефіцієнт динамічної в'язкості води при температурі розчину. Згідно з [17] $\mu'_e = 0,276 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}$. Тоді (68) набуде значення:

$$\mu_p = \exp \cdot \left(7,4 \cdot 0,65^{1,65} \cdot \frac{100}{100 + 101,395} \right) \cdot 0,268 \cdot 10^{-3} = 1,612 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}.$$

У відповідності з [2]: $\lambda_p = 0,174 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$; $\sigma_p = 584,42 \cdot 10^{-4} \text{ Н/м}$. В (68) ρ_{zn} – густина грючої пари при t_{zn} . Згідно з [17] $\rho_{zn} = 2,459 \text{ кг/м}^3$. Підставимо всі значення в (68) і отримаємо.

$$b = 0,075 \cdot \left[1 + 10 \cdot \left(\frac{1261,824}{2,459} - 1 \right)^{-0,67} \right] = 0,086.$$

Використовуючи (15), знайдемо значення коефіцієнта B :

$$\begin{aligned} B &= b \cdot \left(\frac{\lambda_p^2 \cdot \rho_p}{\mu_p \cdot \sigma_p \cdot (t_{кин} + 273)} \right)^{0,33} = \\ &= 0,086 \cdot \left(\frac{0,174^2 \cdot 1261,824}{1,612 \cdot 10^{-3} \cdot 584,42 \cdot 10^{-4} \cdot (101,395 + 273)} \right)^{0,33} = 0,86. \end{aligned}$$

Визначимо термічний опір стінки і забруднень на ній [14]:

$$\sum R_{cm} = \frac{\delta_{cm}}{\lambda_{cm}} + r_{забр1} + r_{забр2}, \quad (69)$$

де $r_{забр1} = 1,1 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}$, $r_{забр2} = 2,0 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}$ [16] – термічні опори стінки викликані забрудненнями зі сторони руху водяною парою та ітаконової кислоти відповідно; $\lambda_{cm} = 46,5 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$ – коефіцієнт теплопровідності матеріалу стінки; $\delta_{cm} = 0,002 \text{ м}$ [13] – товщина стінки. Тоді (69) прийме значення:

$$\sum R_{cm} = \frac{0,002}{46,5} + 1,1 \cdot 10^{-4} + 2 \cdot 10^{-4} = 3,53 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \text{ К/Вт.}$$

Коефіцієнт теплопередачі від гріючої пари до розчину ітаконові кислоти визначається за формулою [23]:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum R_{cm} + \frac{1}{\alpha_2}} = \frac{1}{\frac{1}{A \cdot q^{0,33}} + \sum R_{cm} + \frac{1}{B \cdot q^{0,67}}}; \quad (70)$$

з іншого боку:

$$k = \frac{q}{\Delta t_{кор}}, \quad (71)$$

тоді:

$$y = \frac{q^{1,33}}{A} + q \sum R_{cm} + \frac{q^{0,33}}{B} - \Delta t_{кор} = 0. \quad (72)$$

Побудуємо графік залежності $y = f(q)$, попередньо задавши значеннями теплового потоку $q_1 = 0 \text{ Вт/м}^2$ і $q_2 = 50000 \text{ Вт/м}^2$, тоді:

$$y_1 = \frac{0^{1,33}}{193583,741} + 0 \cdot 3,53 \cdot 10^{-4} + \frac{0^{0,33}}{0,86} - 42,225 = -42,225;$$

$$y_2 = \frac{50000^{1,33}}{193583,741} + 50000 \cdot 3,53 \cdot 10^{-4} + \frac{50000^{0,33}}{0,86} - 42,225 = 25,923.$$

За знайденими значеннями будемо графік залежності $y = f(q)$ зображений на рисунку 4.2.

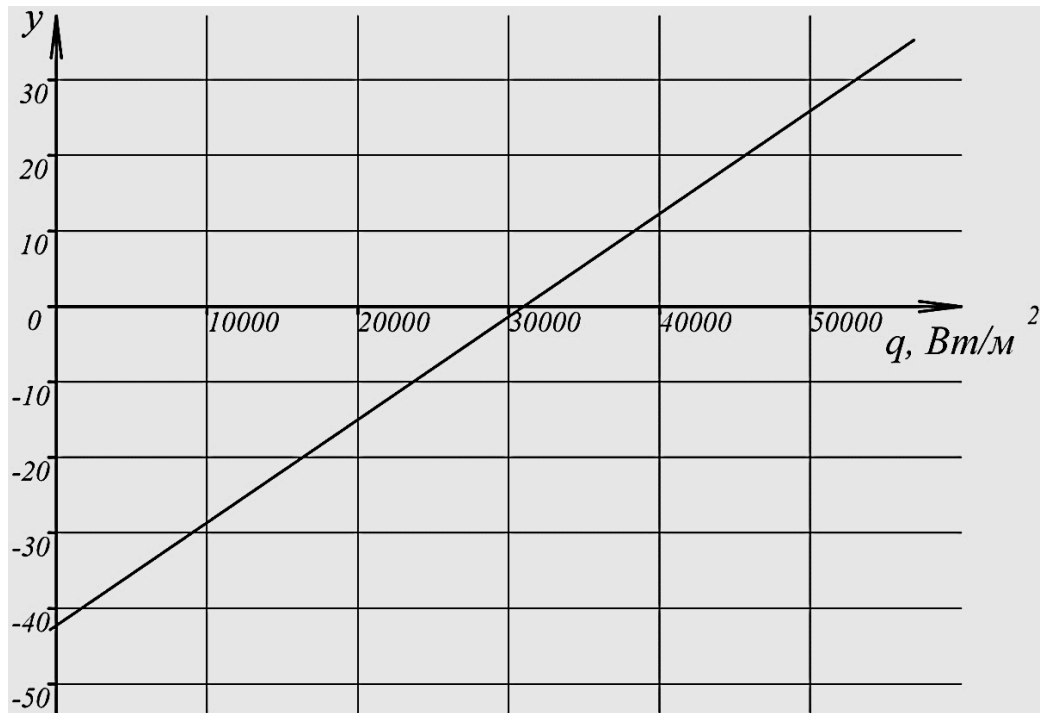


Рисунок 4.2 – Графік залежності $y = f(q)$

З графіку знаходимо значення питомого теплового потоку при $y = 0$:
 $q = 30980 \text{ Вт/м}^2$.

Коефіцієнти тепловіддачі визначаються за формулами (65) та (66) [23]:

$$\alpha_1 = A \cdot q^{-0,33} = 193583,741 \cdot 30980^{-0,33} = 6380 \text{ Вт/м}^2 \text{ К},$$

$$\alpha_2 = B \cdot q^{0,67} = 0,86 \cdot 30980^{0,67} = 878 \text{ Вт/м}^2 \text{ К}.$$

Коефіцієнт теплопередачі за формулою (70)

$$k = \frac{1}{\frac{1}{6380} + 3,53 \cdot 10^{-4} + \frac{1}{878}} = 607 \text{ Вт/м}^2 \text{ К}.$$

Визначаємо необхідну площу поверхні теплообміну [23]:

$$F = \frac{Q_{zn}}{k \cdot \Delta t_{nol}} = \frac{5,466 \cdot 10^6}{607 \cdot 42,225} = 213,261 \text{ м}^2.$$

За ГОСТ 11987- 81 приймаємо випарний апарат тип 1 виконання 2 з природною циркуляцією і виносною гріючою камерою з наступними параметрами (див. рисунок 13):

– площа поверхні теплообміну $F = 250 \text{ м}^2$;

- висота гріючих труб $H_{mp} = 4000$ мм ;
- внутрішній діаметр гріючої камери $D = 1400$ мм;
- внутрішній діаметр сепаратора $D_1 = 3200$ мм;
- внутрішній діаметр циркуляційної труби $D_2 = 900$ мм;
- діаметр труб $d = 38 \times 2$ мм.

4.3.2 Гідрравлічний розрахунок випарного апарату

Швидкість руху ітаконової кислоти у випарному апараті [26]:

$$w = \frac{4 \cdot G_n}{\pi \cdot D^2 \cdot \rho_p} = \frac{4 \cdot 2,89}{3,14 \cdot 1,4^2 \cdot 1261,8} = 1,49 \cdot 10^{-3} \text{ м/с.}$$

Критерій Рейнольдса при даній швидкості:

$$Re = \frac{w \cdot d \cdot \rho}{\mu} = \frac{1,49 \cdot 10^{-3} \cdot 1,4 \cdot 1261,824}{1,612 \cdot 10^{-3}} = 1633,$$

тоді коефіцієнт опору рідини при русі її по трубах:

$$\lambda = \frac{64}{Re} = \frac{64}{1633} = 0,039.$$

Коефіцієнти місцевих опорів [26]:

- вхід у апарат та вихід із нього: $\xi_1 = 1,5$;
- вхід у труби та вихід із них: $\xi_2 = 1,0$;
- поворот на 90° : $\xi_3 = 1,0$.

Сума коефіцієнтів місцевих опорів:

$$\sum \xi = 2 \cdot \xi_1 + 2 \cdot \xi_2 + 4 \cdot \xi_3 = 2 \cdot 1,5 + 2 \cdot 1 + 4 \cdot 1 = 9,0.$$

Перепад тиску в апараті [26]:

$$\Delta p = \left(\lambda \cdot \frac{l}{d} + \sum \xi \right) \cdot \frac{w^2 \cdot \rho}{2} =$$

$$= \left(0,039 \cdot \frac{5}{0,038} + 9,0 \right) \cdot \frac{1,49^2 \cdot 10^{-6} \cdot 1261,8}{2} = 0,02 \text{ МПа.}$$

Оскільки перепад тиску дуже малий, то використовувати додатковий насос не потрібно.

4.3.3 Розрахунок барометричного конденсатора

Масова витрата води, що витрачається на конденсацію вторинної пари [27]:

$$G_{\epsilon} = \frac{W \cdot (i_0 - c_{\epsilon 0} \cdot t_{0\kappa})}{c_{\epsilon 0} \cdot (t_{0\kappa} - t_{0n})}, \quad (73)$$

де $t_{0\kappa}$ – кінцева температура суміші води та конденсату вторинної пари:

$$t_{0\kappa} = t_0 - 3,0 = 92,02 - 3,0 = 89,02 \text{ } ^\circ\text{C};$$

t_{0n} – початкова температура води, якою конденсують вторинну пару, $t_{0n} = 20^\circ\text{C}$ [27]; i_0 – питома ентальпія вторинної пари в барометричному конденсаторі, $i_0 = 2662,04 \cdot 10^3 \text{ Дж/кг}$ [24]; $c_{\epsilon 0}$ – теплоємність води при $t_{0\kappa}$, $c_{\epsilon 0} = 4,19 \cdot 10^3 \text{ Дж/кг К}$ [17], тоді (73) прийме значення:

$$G_{\epsilon} = \frac{2,223 \cdot (2662,04 \cdot 10^3 - 4,19 \cdot 10^3 \cdot 89,02)}{4,19 \cdot 10^3 \cdot (89,02 - 20)} = 17,6 \text{ кг/с.}$$

Діаметр барометричного конденсатора [27]:

$$D_0 = \sqrt{\frac{4 \cdot W}{\rho_{\epsilon n} \cdot \pi \cdot w_{\epsilon n}}}, \quad (74)$$

де $\rho_{\epsilon n}$ – густина вторинної пари при t_0 , $\rho_{\epsilon n} = 0,455 \text{ кг/м}^3$ [17]; $w_{\epsilon n}$ – швидкість руху вторинної пари:

$$w_{\epsilon n} = \frac{4 \cdot W}{\pi \cdot d_K^2 \cdot \rho_{\epsilon n}}, \quad (75)$$

де d_K – діаметр умовного проходу штуцера виходу вторинної пари: $d_K = 800 \text{ мм}$, тоді, швидкість вторинної пари складатиме:

$$w_{\epsilon n} = \frac{4 \cdot 2,223}{3,14 \cdot 0,8^2 \cdot 0,455} = 9,725 \text{ м/с.}$$

Підставимо отримані значення в (74) і отримаємо:

$$D_0 = \sqrt{\frac{4 \cdot 2,223}{0,455 \cdot 3,14 \cdot 9,725}} = 0,8 \text{ м.}$$

Обираємо стандартний барометричний конденсатор [27] з наступними параметрами (див. рисунок 4.3):

- внутрішній діаметр барометричного конденсатору $D_0 = 800$ мм;
- відстань від верхньої полиці до кришки апарату $a = 1300$ мм;
- відстань від нижньої полиці до днища апарату $r = 1200$ мм;
- ширина полиці $b' = 500$ мм;
- відстань між осями конденсатору та пастки $K'_1 = 950$ мм,
 $K'_2 = 835$ мм;
- висота апарату $H_0 = 5080$ мм;
- ширина апарату $T_0 = 2350$ мм;
- діаметр пастки $D_{n1} = 500$ мм, $D_{n2} = 400$ мм;
- висота пастки $h_{n1} = 1700$ мм, $h_{n2} = 1350$ мм;
- відстань між полицями $a_1 = 200$ мм, $a_2 = 260$ мм, $a_3 = 320$ мм,
 $a_4 = 380$ мм, $a_5 = 440$ мм;
- діаметри умовного проходу штуцерів:
 - А – для входу вторинної пари 350 мм;
 - Б – для входу води 200 мм;
 - В – для виходу парогазової суміші 125 мм;
 - Г – для барометричної труби 200 мм;
 - С – для з'єднання з атмосферою 25 мм;
 - И – для входу парогазової суміші 180 мм;
 - Ж – для виходу парогазової суміші 80 мм;
 - Е – для барометричної труби 70 мм.

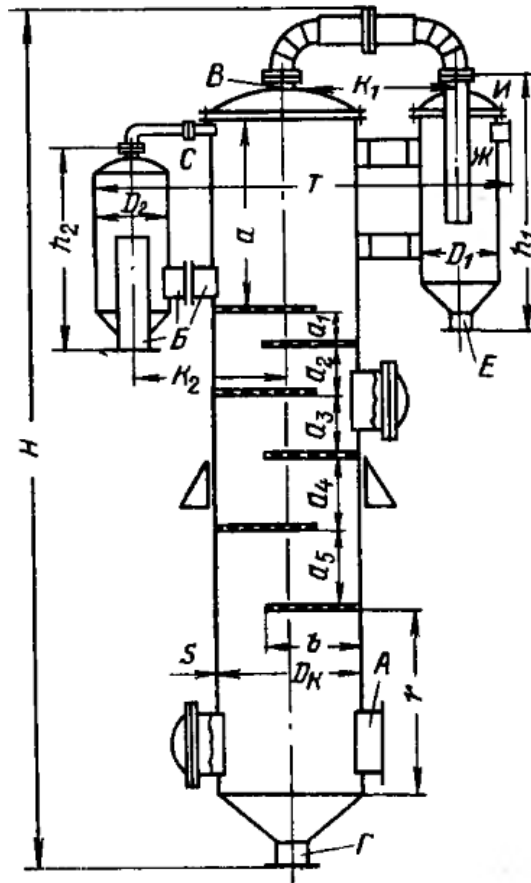


Рисунок 4.3 – Схема барометричного конденсатора з сегментними перегородками

Швидкість води в барометричній трубі:

$$w_{\epsilon} = \frac{4 \cdot (G_{\epsilon} + W)}{\rho_{\epsilon 0} \cdot \pi \cdot d_{\epsilon m}^2}, \quad (76)$$

де $\rho_{\epsilon 0}$ – густина води при температурі t_0 : $\rho_{\epsilon 0} = 963,6 \text{ кг/м}^3$ [14]; $d_{\epsilon m}$ – діаметр барометричних труб: $d_{\epsilon m} = 200 \text{ мм}$ [26], підставивши в (76), отримаємо значення швидкості:

$$w_{\epsilon} = \frac{4 \cdot (17,6 + 2,223)}{963,6 \cdot 3,14 \cdot 0,2^2} = 0,655 \text{ м/с.}$$

Висота барометричних труб визначається зі співвідношення [27]:

$$H_{\epsilon m} = \frac{B'}{\rho_{\epsilon 0} \cdot g} + \left(1 + \sum \xi' + \lambda' \cdot \frac{H_{\epsilon m}}{d_{\epsilon m}} \right) \cdot \frac{w_{\epsilon}^2}{2 \cdot g} + 0,5, \quad (77)$$

де B' – залишковий тиск (вакуум) у барометричному конденсаторі:

$$B' = p_{атм} - p_0, \quad (78)$$

де $p_{атм}$ – атмосферний тиск: $p_{атм} = 0,1 \cdot 10^6$ Па [24]; p_0 – тиск у барометричному конденсаторі при t_0 : $p_0 = 0,076 \cdot 10^6$ Па [24], тоді:

$$B' = 0,1 \cdot 10^6 - 0,076 \cdot 10^6 = 0,024 \cdot 10^6 \text{ Па};$$

$\sum \xi'$ – сумарний коефіцієнт місцевого опору, $\sum \xi' = 2$ [26]; λ' – коефіцієнт тертя (визначається в залежності від режиму руху рідини в трубах).

Критерій Рейнольдса визначаємо за формулою:

$$Re' = \frac{w_e \cdot d_{\delta m} \cdot \rho_{e0}}{\mu_{e0}}, \quad (79)$$

де μ_{e0} – коефіцієнт динамічної в'язкості води при температурі t_0 : $\mu_{e0} = 0,308 \cdot 10^{-3}$ Па с [17], тоді:

$$Re' = \frac{0,655 \cdot 0,2 \cdot 963,6}{0,308 \cdot 10^{-3}} = 410.$$

При знайденому критерії Рейнольдса коефіцієнт тертя визначається за формулою [26]:

$$\lambda' = 0,11 \cdot \left(\frac{\Delta}{d_{\delta m}} + \frac{68}{Re'} \right)^{0,25}, \quad (80)$$

де Δ – шорсткість труб: $\Delta = 0,2$ мм [24], тоді:

$$\lambda' = 0,11 \cdot \left(\frac{0,2 \cdot 10^{-3}}{0,2} + \frac{68}{410} \right)^{0,25} = 0,07.$$

Підставимо отримані значення у (77) і перепишемо його наступним чином:

$$H_{\delta m} = \frac{0,024 \cdot 10^6}{963,6 \cdot 9,81} + \left(1 + \frac{2}{0,07} \cdot \frac{H_{\delta m}}{0,2} \right) \cdot \frac{0,655^2}{2 \cdot 9,81} + 0,5,$$

зробивши необхідні перетворення, отримаємо: $H_{\delta m} = 3,234$ м.

Продуктивність вакуум-насосу визначається за формулою [27]:

$$\begin{aligned} G_{нов} &= 2,5 \cdot 10^{-5} \cdot (W + G_{\delta}) + 0,01 \cdot W = \\ &= 2,5 \cdot 10^{-5} \cdot (2,223 + 17,6) + 0,01 \cdot 2,223 = 22,725 \cdot 10^{-3} \text{ кг/с.} \end{aligned}$$

Об'ємна продуктивність вакуум-насосу:

$$V_{нов} = R \cdot (273 + t_{нов}) \cdot \frac{G_{нов}}{M_{нов} \cdot p_{нов}}, \quad (81)$$

де R – універсальна газова стала: $R = 8,31 \text{ Дж/моль К}$ [24]; $M_{нов}$ – молярна маса повітря: $M_{нов} = 29 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$ [24]; $t_{нов}$ – температура повітря, яка визначається за формулою:

$$t_{нов} = t_{он} + 4 + 0,1 \cdot (t_{ок} - t_{он}) = 20 + 4 + 0,1 \cdot (89,02 - 20) = 30,9^\circ \text{C};$$

$p_{нов}$ – тиск повітря в апараті:

$$p_{нов} = p_0 - p_n, \quad (82)$$

p_n – тиск насиченої водяної пари при $t_{нов}$: $p_n = 0,45 \cdot 10^4 \text{ Па}$ [24], тоді:

$$p_{нов} = 0,76 \cdot 10^5 - 0,045 \cdot 10^5 = 0,715 \cdot 10^5 \text{ Па}.$$

Підставивши необхідні значення в (30), отримаємо:

$$V_{нов} = 8,31 \cdot (273 + 30,9) \cdot \frac{22,725 \cdot 10^{-3}}{29 \cdot 10^{-3} \cdot 0,715 \cdot 10^5} = 0,028 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Зі стандартного ряду для нашого випарного апарату обираємо вакуум-насос ВВН-3 із такими параметрами [27]:

- продуктивність $V_{нов} = 3 \text{ м}^3/\text{хв}$;
- потужність на валу $N_{нов} = 6,5 \text{ кВт}$.

4.3.4 Розрахунок штуцерів випарного апарату

Вихідні дані:

- додаток до розрахункової товщини стінки $c' = 1,5 \text{ мм}$;
- допустиме напруження матеріалу штуцера $[\sigma] = 267 \text{ МПа}$;
- коефіцієнт міцності зварних швів $\phi = 0,95$.

У таблиці 11 наведено перелік штуцерів, їх умовний діаметр, та основні параметри фланцевого з'єднання останніх з трубопроводами.

Таблиця 4.1 Характеристика штуцерів випарного апарату

№	Умовне позначення	D_y , мм	D_ϕ , мм	p , МПа	Болти	z , шт	h_ϕ , мм
1	Е	400	535	0,4	М22	16	18
2	Ж	800	975	0,1	М30	24	21
3	К	65	160	0,1	М14	4	11
4	Л	50	140	0,1	М14	4	10
5	М	50	140	0,2	М14	4	10
6	Н	40	130	0,136	М14	4	10
7	П	50	140	0,136	М14	4	10
8	Р	50	140	0,1	М14	4	10
9	С	25	100	0,1	М11	4	10
10	Т	25	100	0,1	М11	4	10
11	Ш	40	130	0,1	М14	4	10

Схема штуцера до розрахунку наведена на рисунку 6. Товщини стінок патрубків розраховуємо за формулою (19).

Штуцер для вводу гріючої пари ($D_y = 400$ мм):

$$S_1^R = \frac{0,4 \cdot 0,4}{2 \cdot 267 \cdot 0,95 - 0,4} = 0,32 \text{ мм},$$

з урахуванням додатку c' :

$$S_1' = S_1^R + c' = 0,32 + 1,5 = 1,82 \text{ мм}.$$

Штуцер для виходу вторинної пари ($D_y = 800$ мм):

$$S_2^R = \frac{0,1 \cdot 0,8}{2 \cdot 267 \cdot 0,95 - 0,1} = 0,16 \text{ мм},$$

з урахуванням додатку c' :

$$S_2' = S_2^R + c' = 0,16 + 1,5 = 1,66 \text{ мм}.$$

Штуцер для вводу розчину ($D_y = 65$ мм):

$$S_3^R = \frac{0,1 \cdot 0,065}{2 \cdot 267 \cdot 0,95 - 0,1} = 0,01 \text{ мм},$$

з урахуванням додатку c' :

$$S_3' = S_3^R + c' = 0,01 + 1,5 = 1,51 \text{ мм}.$$

Штуцер для виходу конденсату і для з'єднання з атмосферою ($D_y = 50$ мм):

$$S_4^R = S_8^R = \frac{0,1 \cdot 0,05}{2 \cdot 267 \cdot 0,95 - 0,1} = 0,01 \text{ мм},$$

з урахуванням додатку c' :

$$S_4' = S_4^R + c' = 0,01 + 1,5 = 1,51 \text{ мм}.$$

Штуцер для миття апарату ($D_y = 40$ мм):

$$S_5^R = \frac{0,2 \cdot 0,05}{2 \cdot 267 \cdot 0,95 - 0,2} = 0,02 \text{ мм},$$

з урахуванням додатку c' :

$$S_5' = S_5^R + c' = 0,02 + 1,5 = 1,52 \text{ мм}.$$

Штуцер для відбору проб ($D_y = 40$ мм):

$$S_6^R = \frac{0,136 \cdot 0,04}{2 \cdot 267 \cdot 0,95 - 0,136} = 0,01 \text{ мм},$$

з урахуванням додатку c' :

$$S_6' = S_6^R + c' = 0,01 + 1,5 = 1,51 \text{ мм}.$$

Штуцер для зливання розчину з апарату ($D_y = 50$ мм):

$$S_7^R = \frac{0,136 \cdot 0,05}{2 \cdot 267 \cdot 0,95 - 0,136} = 0,01 \text{ мм},$$

з урахуванням додатку c' :

$$S_7' = S_7^R + c' = 0,01 + 1,5 = 1,51 \text{ мм}.$$

Штуцер для гільзи термометра і манометра ($D_y = 25$ мм):

$$S_9^R = S_{10}^R = \frac{0,1 \cdot 0,025}{2 \cdot 267 \cdot 0,95 - 0,1} = 0,005 \text{ мм},$$

з урахуванням додатку c' :

$$S_9' = S_9^R + c' = 0,005 + 1,5 = 1,505 \text{ мм}.$$

Штуцер для гільзи барометра ($D_y = 40$ мм):

$$S_{11}^R = \frac{0,1 \cdot 0,04}{2 \cdot 267 \cdot 0,95 - 0,1} = 0,01 \text{ мм},$$

з урахуванням додатку c' :

$$S'_{11} = S_{11}^R + c' = 0,01 + 1,5 = 1,51 \text{ мм}.$$

Приймаємо товщину стінок всіх штуцерів рівною 2 мм.

Довжину штуцерів визначаємо за формулою (20).

Штуцер для вводу гріючої пари ($D_y = 400 \text{ мм}$):

$$l_1 = 1,25 \cdot \sqrt{0,4 \cdot (0,002 - 0,0015)} = 0,018 \text{ м}.$$

Штуцер для виводу вторинної пари ($D_y = 800 \text{ мм}$):

$$l_2 = 1,25 \cdot \sqrt{0,8 \cdot (0,002 - 0,0015)} = 0,025 \text{ м}.$$

Штуцер для вводу розчину ($D_y = 65 \text{ мм}$):

$$l_3 = 1,25 \cdot \sqrt{0,065 \cdot (0,002 - 0,0015)} = 0,007 \text{ м}.$$

Штуцер для відведення конденсату, промивання апарату, зливу розчину і з'єднання з атмосферою ($D_y = 50 \text{ мм}$):

$$l_4 = l_5 = l_7 = l_8 = 1,25 \cdot \sqrt{0,05 \cdot (0,002 - 0,0015)} = 0,006 \text{ м}.$$

Штуцер для відбору проб та гільзи баромера ($D_y = 40 \text{ мм}$):

$$l_6 = l_{11} = 1,25 \cdot \sqrt{0,04 \cdot (0,002 - 0,0015)} = 0,006 \text{ м}.$$

Штуцер для гільзи термометра та манометра ($D_y = 25 \text{ мм}$):

$$l_9 = l_{10} = 1,25 \cdot \sqrt{0,025 \cdot (0,002 - 0,0015)} = 0,004 \text{ мм}.$$

Розрахунковий виліт штуцерів має досить мале значення, то (для зручності з'єднання з трубопроводами) приймаємо його рівними 120 мм.

4.3.5 Розрахунок товщини стінки деталей випарного апарату

Вихідні дані:

- абсолютний тиск гріючої пари $p_{gn} = 0,4 \text{ МПа}$;
- абсолютний тиск навколишнього середовища $p_{atm} = 0,1 \text{ МПа}$;

- абсолютний тиск пари в сепараторі $p_1 = 0,08$ МПа;
- діаметр гріючої камери $D = 1,4$ м;
- діаметр сепаратора $D_1 = 3,2$ м;
- діаметр циркуляційної труби $D_2 = 0,9$ м;
- висота гріючої камери $H_{зк} = 7,29$ м;
- висота днища гріючої камери $H_{дн.зк} = 2,39$ м;
- висота царги гріючої камери $H_{ц.зн} = 1,68$ м;
- висота верхньої царги сепаратора $H_{в.ц.с} = 1,86$ м;
- висота нижньої царги сепаратора $H_{н.ц.с} = 1,89$ м;
- висота днища сепаратора $H_{дн.с} = 1,49$ м;
- висота циркуляційної труби $H_{ц.т} = 3,39$ м;
- половина кута конусності днища сепаратора $\alpha = 45^\circ$;
- модуль пружності (Юнга) матеріалу стінки $E = 2 \cdot 10^5$ МПа;
- коефіцієнт міцності зварних швів $\varphi = 0,95$;
- коефіцієнт запасу стійкості $n_y = 2,4$;
- густина розчину ітаконової кислоти $\rho = 1261,8$ кг/м³;
- прискорення вільного падіння $g = 9,81$ м/с².

4.3.5.1 Розрахунок товщини стінки деталей гріючої камери

4.4.5.1.1 Розрахунок товщини стінки корпусу гріючої камери

Схема до розрахунку товщини, що знаходиться під внутрішнім тиском зображено на рисунку 7.

Розрахункову товщину стінки циліндричного корпусу гріючої камери розраховуємо за формулою:

$$S_{к.зк}^R = \frac{p_{зн} \cdot D}{2[\sigma] \cdot \varphi - p_{зн}} = \frac{0,4 \cdot 10^6 \cdot 1,4}{2 \cdot 267 \cdot 10^6 \cdot 0,95 - 0,4 \cdot 10^6} = 0,0011 \text{ м.}$$

тоді, за формулою (23) товщина стінки буде рівна:

$$S_{\kappa, \kappa\kappa} = 1,1 + 1,5 + 0 + 0 + 1,4 = 4 \text{ мм},$$

де $c_4 = 1,4 \text{ мм}$.

Допустимий тиск на стінку:

$$[p]_{\kappa, \kappa\kappa} = \frac{2[\sigma] \cdot \phi \cdot (S_{\kappa\kappa} - c_1)}{D + S_{\kappa\kappa} - c_1} = \frac{2 \cdot 267 \cdot 10^6 \cdot 0,95 \cdot (0,004 - 0,0015)}{1,4 + 0,004 - 0,0015} = 0,904 \cdot 10^6 \text{ Па}.$$

Перевіримо виконання умови міцності (24):

$$0,904 \text{ МПа} > 0,4 \text{ МПа}.$$

Умова виконується, отже приймаємо товщину стінки гріючої камери рівною 4 мм.

4.4.5.1.2 Розрахунок товщини стінки днища гріючої камери

Розрахункова схема еліптичного днища, що знаходиться під дією внутрішнього тиску зображена на рисунку 8.

Для знаходження товщини стінки днища гріючої камери визначимо гідравлічний тиск, що діє на нього:

$$p_{\kappa\kappa, \kappa\kappa} = \rho_p \cdot g \cdot H_{\kappa\kappa} = 1261,8 \cdot 9,81 \cdot 7,29 = 0,09 \cdot 10^6 \text{ Па},$$

тоді розрахунковий тиск у апараті:

$$p_{\kappa\kappa} = p_1 + p_{\kappa\kappa} = 0,08 \cdot 10^6 + 0,09 \cdot 10^6 = 0,17 \cdot 10^6 \text{ Па}.$$

За отриманого тиску товщина стінки днища гріючої камери визначатиметься за формулою [11]:

$$S_{\partial\kappa, \kappa\kappa}^R = \frac{p_{\kappa\kappa} \cdot D}{2[\sigma] \cdot \phi - p_{\kappa\kappa}} \cdot \frac{D}{2H_{\partial\kappa, \kappa\kappa}} = \frac{0,204 \cdot 10^6 \cdot 1,4}{2 \cdot 267 \cdot 10^6 \cdot 0,95 - 0,17 \cdot 10^6} \cdot \frac{1,7}{2 \cdot 2,39} = 0,00016 \text{ м}.$$

За (23) товщина стінки днища гріючої камери дорівнює:

$$S_{\partial\kappa, \kappa\kappa} = 0,16 + 1,5 + 0 + 0 + 0,34 = 2 \text{ мм},$$

де $c_4 = 0,34 \text{ мм}$.

Допустимий тиск на стінку [11]:

$$[p]_{\partial H, \partial K} = \frac{2[\sigma] \cdot \varphi \cdot (S_{\partial H, \partial K} - c')}{D + S_{\partial H, \partial K} - c'} =$$

$$= \frac{2 \cdot 267 \cdot 10^6 \cdot 0,95 \cdot (0,002 - 0,0015)}{1,4 + 0,002 - 0,0015} = 0,181 \cdot 10^6 \text{ Па.}$$

За формулою (24) перевіримо, чи виконується умова міцності:

$$0,181 \text{ МПа} > 0,17 \text{ МПа} - \text{умова виконується.}$$

4.4.5.1.3 Розрахунок товщини стінки царги гріючої камери

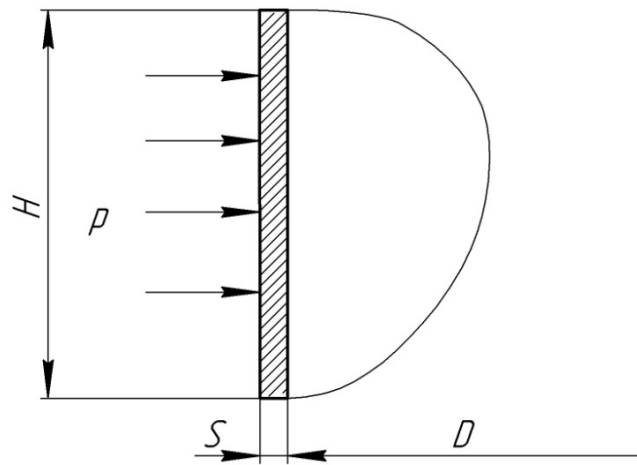


Рисунок 16 – Розрахункова схема для розрахунку товщини стінки циліндричної обичайки, що знаходиться під зовнішнім тиском

Розрахуємо товщину стінки царги гріючої камери за допомогою наступної формули [11]:

$$S_R = \max \left\{ \begin{array}{l} K_2 \cdot D \cdot 10^{-2} \\ 1,1 \cdot p_{атм} \cdot \frac{D}{2[\sigma]} \end{array} \right\}, \quad (83)$$

де K_2 – коефіцієнт, який визначається графічно за допомогою коефіцієнтів:

$$K_3^{ц.зк} = \frac{H_{ц.зк}}{D} = \frac{1,68}{1,4} = 1,2,$$

$$K_1^{ц.зк} = \frac{n_y \cdot p_{атм}}{2,4 \cdot 10^{-6} \cdot E} = \frac{2,4 \cdot 1,0 \cdot 10^5}{2,4 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \cdot 10^5 \cdot 10^6} = 0,5,$$

де E – модуль пружності (Юнга) матеріалу,

$$K_{\text{ц.зк}}^4 = \frac{10^3 \cdot [\sigma]}{E} = \frac{10^3 \cdot 267 \cdot 10^6}{2 \cdot 10^5 \cdot 10^6} = 1,335,$$

тоді $K_2^{\text{ц.зк}} = 0,35$. Отже, розрахункове значення товщини стінки царги гріючої камери за (83):

$$S_{\text{ц.зк}}^{R'} = K_2^{\text{ц.зк}} \cdot D \cdot 10^{-2} = 0,35 \cdot 1,4 \cdot 10^{-2} = 0,0049 \text{ м};$$

$$S_{\text{ц.зк}}^{R''} = 1,1 \cdot p_{\text{атм}} \cdot \frac{D}{2[\sigma]} = 1,1 \cdot 1,0 \cdot 10^5 \cdot \frac{1,4}{2 \cdot 267 \cdot 10^6} = 0,0003 \text{ м},$$

тоді: $S_{\text{ц.зк}}^R = S_{\text{ц.зк}}^{R'} = 4,9 \text{ мм}$.

Дійсна товщина стінки царги гріючої камери за (23):

$$S_{\text{ц.зк}} = 4,9 + 1,5 + 0 + 0 + 1,6 = 8 \text{ мм},$$

де $c_4 = 1,6 \text{ мм}$.

Допустимий тиск на стінку:

$$[p] = \frac{[p]}{\sqrt{1 + \left(\frac{[p]_M}{[p]_E} \right)^2}}, \quad (84)$$

де $[p]_M$ – допустимий зовнішній тиск з умов міцності в умовах пружності:

$$[p]_{\text{ц.зк}}^M = \frac{2[\sigma] \cdot (S_{\text{ц.зк}} - c')}{D + S_{\text{ц.зк}} - c'} = \frac{2 \cdot 267 \cdot 10^6 \cdot (0,008 - 0,0015)}{1,4 + 0,008 - 0,0015} = 2,468 \cdot 10^6 \text{ Па};$$

$[p]_E$ – допустимий зовнішній тиск з умов стійкості в умовах пружності:

$$[p]_{\text{ц.зк}}^E = \frac{20,8 \cdot 10^{-6} \cdot E}{n_y \cdot B_1} \cdot \frac{D}{H_{\text{ц.зк}}} \cdot \left[\frac{100 \cdot (S - c')}{D} \right]^{2,5}, \quad (85)$$

у якій: n_y – коефіцієнт запасу стійкості; B_1 – коефіцієнт, який вибирається із співвідношення [11]:

$$B_1 = \min \left\{ 1,0; 9,45 \cdot \frac{D}{H} \cdot \sqrt{\frac{D}{100 \cdot (S - c')}} \right\}, \quad (86)$$

$$B_1' = 1,0,$$

$$B_1'' = 9,45 \cdot \frac{D}{H_{ц.зк}} \cdot \sqrt{\frac{D}{100 \cdot (S_{ц.зк} - c')}} =$$

$$= 9,45 \cdot \frac{1,4}{1,68} \cdot \sqrt{\frac{1,4}{100 \cdot (0,008 - 0,0015)}} = 11,557.$$

Отже, $B_1 = B_1' = 1,0$.

Підставимо в (85) і отримаємо:

$$[p]_{ц.зк}^E = \frac{20,8 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \cdot 10^5 \cdot 10^6}{2,4 \cdot 1,0} \cdot \frac{1,4}{1,67} \cdot \left[\frac{100 \cdot (0,008 - 0,0015)}{1,4} \right]^{2,5} = 0,212 \cdot 10^6 \text{ Па}$$

Підставимо отримані значення допустимих тисків у (84), і перевіримо, чи виконується співвідношення (24):

$$[p]_{ц.зк} = \frac{2,468}{\sqrt{1 + \left(\frac{2,468}{0,212} \right)^2}} = 0,211 \text{ МПа};$$

$0,211 \text{ МПа} > 0,1 \text{ МПа}$ – умова міцності виконується.

4.4.5.1.4 Розрахунок товщини стінки кришки гріючої камери

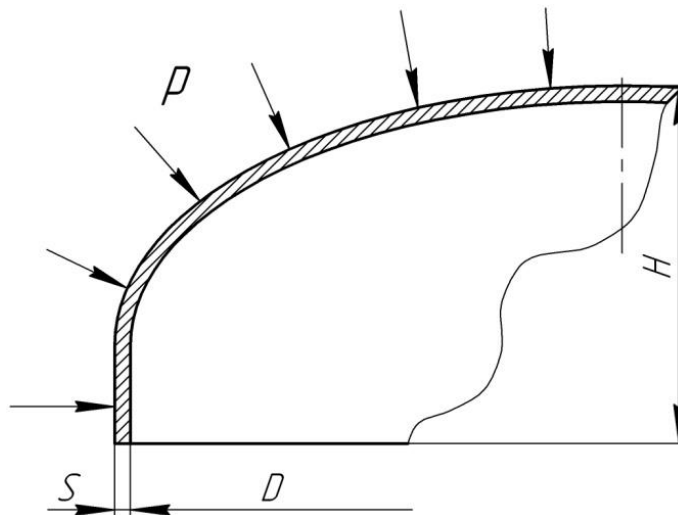


Рисунок 4.4 – Розрахункова схема для розрахунку товщини стінки

еліптичної кришки (днища), що знаходиться під зовнішнім тиском

Розрахунок товщини кришки гріючої камери проводимо у відповідності зі співвідношенням [11]:

$$S_{\kappa, \zeta \kappa}^R = \max \left\{ \frac{0,9D}{510} \cdot \sqrt{\frac{n_y \cdot p_{атм}}{10^{-6} \cdot E}}, \frac{p_{атм}}{2[\sigma]} \cdot D \right\}, \quad (87)$$

$$S_{\kappa, \zeta \kappa}^{R'} = \frac{0,9D}{510} \cdot \sqrt{\frac{n_y \cdot p_{атм}}{10^{-6} \cdot E}} = \frac{0,9 \cdot 1,4}{510} \cdot \sqrt{\frac{2,4 \cdot 1,0 \cdot 10^5}{10^{-6} \cdot 2 \cdot 10^5 \cdot 10^6}} = 0,0027 \text{ м};$$

$$S_{\kappa, \zeta \kappa}^{R''} = \frac{p_{атм} \cdot D}{2[\sigma]} = \frac{1,0 \cdot 10^5 \cdot 1,4}{2 \cdot 267 \cdot 10^6} = 0,0003 \text{ м},$$

тоді, $S_{\kappa, \zeta \kappa}^R = S_{\kappa, \zeta \kappa}^{R'} = 2,7 \text{ мм}.$

Виконавча товщина стінки кришки гріючої камери за (24):

$$S_{\kappa, \zeta \kappa} = 2,7 + 1,5 + 0 + 0 + 1,8 = 6 \text{ мм},$$

де $c_4 = 1,8 \text{ мм}.$

Допустимий тиск визначається за формулою (84), у якій [11]:

$$[p]_{\kappa, \zeta \kappa}^M = \frac{2[\sigma] \cdot (S_{\kappa, \zeta \kappa} - c')}{D + 0,5(S_{\kappa, \zeta \kappa} - c')} = \frac{2 \cdot 267 \cdot 10^6 \cdot (0,006 - 0,0015)}{1,4 + 0,5 \cdot (0,006 - 0,0015)} = 1,714 \cdot 10^6 \text{ Па},$$

$$[p]_{\kappa}^E = \frac{26 \cdot 10^{-6} \cdot E}{n_y} \cdot \left| \frac{100 \cdot (S_{\kappa} - c')}{K_e \cdot D} \right|^2, \quad (88)$$

де:

$$K_e^{\kappa, \zeta \kappa} = \frac{1 + (2,4 + 8 \cdot x') \cdot x'}{1 + (3 + 10 \cdot x') \cdot x'}, \quad (89)$$

у якій:

$$x'_{\kappa, \zeta \kappa} = \frac{15 \cdot (S_{\kappa, \zeta \kappa} - c')}{D} = \frac{15 \cdot (0,006 - 0,0015)}{1,4} = 0,048.$$

Підставимо значення x' в (89), а потім отримане значення в (88) і отримаємо:

$$K_e = \frac{1 + (2,4 + 8 \cdot 0,048) \cdot 0,048}{1 + (3 + 10 \cdot 0,048) \cdot 0,048} = 0,971,$$

$$[p]_{\kappa, \kappa}^E = \frac{26 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \cdot 10^5 \cdot 10^6}{2,4} \cdot \frac{\left[100 \cdot (0,006 - 0,0015) \right]^2}{0,971 \cdot 1,4} = 0,237 \cdot 10^6 \text{ Па.}$$

Підставимо отримані значення допустимих тисків у (84), і перевіримо, чи виконується співвідношення (24):

$$[p]_{\kappa, \kappa} = \frac{1,714}{\sqrt{1 + \left(\frac{1,714}{0,237} \right)^2}} = 0,235 \text{ МПа;}$$

$0,235 \text{ МПа} > 0,1 \text{ МПа}$ – умова міцності виконується.

4.3.5.2 Розрахунок товщини стінки деталей сепаратора

4.4.5.2.1 Розрахунок товщини стінки верхньої царги сепаратора

Розрахункову товщину стінки верхньої царги сепаратора (див. рисунок 16) знаходимо за формулою (83) у якій [11]:

$$K_3^{в.ц.с} = \frac{H_{в.ц.с}}{D_1} = \frac{1,86}{3,2} = 0,581,$$

$$K_1^{в.ц.с} = \frac{n_y \cdot p_{атм}}{2,4 \cdot 10^{-6} \cdot E} = \frac{2,4 \cdot 1,0 \cdot 10^5}{2,4 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \cdot 10^5 \cdot 10^6} = 0,5,$$

$$K_4^{в.ц.с} = \frac{10^3 \cdot [\sigma]}{E} = \frac{10^3 \cdot 267 \cdot 10^6}{2 \cdot 10^5 \cdot 10^6} = 1,335,$$

тоді: $K_2^{в.ц.с} = 0,28$;

$$S_{в.ц.с}^{R'} = K_2 \cdot D_1 \cdot 10^{-2} = 0,28 \cdot 3,2 \cdot 10^{-2} = 0,009 \text{ м,}$$

$$S_{в.ц.с}^{R''} = 1,1 \cdot p_{атм} \cdot \frac{D_1}{2[\sigma]} = 1,1 \cdot 1,0 \cdot 10^5 \cdot \frac{3,2}{2 \cdot 267 \cdot 10^6} = 0,0007 \text{ м.}$$

Приймаємо $S_{в.ц.с}^R = S_{в.ц.с}^{R'} = 9 \text{ мм.}$

Виконавча товщина стінки за формулою (23):

$$S_{в.ц.с} = 9 + 1,5 + 0 + 0 + 1,5 = 12 \text{ мм,}$$

де $c_4 = 1,5 \text{ мм.}$

Допустимий тиск визначається за формулою (84), у якій:

$$[p]_{в.ц.с}^M = \frac{2[\sigma] \cdot (S_{в.ц.с} - c')}{D_1 + S_{в.ц.с} - c'} = \frac{2 \cdot 267 \cdot 10^6 \cdot (0,012 - 0,0015)}{3,2 + 0,012 - 0,0015} = 1,746 \cdot 10^6 \text{ Па},$$

$$[p]_{в.ц.с}^E = \frac{20,8 \cdot 10^{-6} \cdot E}{n \cdot B} \cdot \frac{D}{H} \cdot \left[\frac{100 \cdot (S_{в.ц.с} - c')}{D} \right]^{2,5}, \quad (90)$$

де коефіцієнт B_1 визначається за формулою (86) у якій:

$$B'_1 = 1,0,$$

$$B''_1 = 9,45 \cdot \frac{D_1}{H} \cdot \sqrt{\frac{D_1}{100 \cdot (S_{в.ц.с} - c')}} =$$

$$= 9,45 \cdot \frac{3,2}{1,86} \cdot \sqrt{\frac{3,2}{100 \cdot (0,012 - 0,0015)}} = 28,382.$$

Приймаємо $B_1 = B'_1 = 1,0$, тоді:

$$[p]_{ц.с}^E = \frac{20,8 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \cdot 10^5 \cdot 10^6}{2,4 \cdot 1,0} \cdot \frac{3,2}{1,86} \cdot \left[\frac{100 \cdot (0,012 - 0,0015)}{3,2} \right]^{2,5} = 0,184 \cdot 10^6 \text{ Па}.$$

Підставимо отримані значення допустимих тисків у (84), і перевіримо, чи виконується співвідношення (24):

$$[p]_{ц.с} = \frac{1,746}{\sqrt{1 + \left(\frac{1,746}{0,184} \right)^2}} = 0,183 \text{ МПа};$$

$0,183 \text{ МПа} > 0,1 \text{ МПа}$ – умова міцності виконується.

4.4.5.2.2 Розрахунок товщини стінки нижньої царги сепаратора

Розрахункову товщину стінки нижньої царги сепаратора (див. рисунок 16) знаходимо за формулою (83) у якій:

$$K_3^{н.ц.с} = \frac{H_{н.ц.с}}{D_1} = \frac{1,89}{3,2} = 0,591,$$

$$K_1^{н.ц.с} = \frac{n_y \cdot p_{атм}}{2,4 \cdot 10^{-6} \cdot E} = \frac{2,4 \cdot 1,0 \cdot 10^5}{2,4 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \cdot 10^5 \cdot 10^6} = 0,5,$$

$$K_{4}^{н.ц.с} = \frac{10^3 \cdot [\sigma]}{E} = \frac{10^3 \cdot 267 \cdot 10^6}{2 \cdot 10^5 \cdot 10^6} = 1,335,$$

тоді: $K_2^{н.ц.с} = 0,28$;

$$S_{н.ц.с}^{R'} = K_2^{н.ц.с} \cdot D_1 \cdot 10^{-2} = 0,28 \cdot 3,2 \cdot 10^{-2} = 0,009 \text{ м},$$

$$S_{н.ц.с}^{R''} = 1,1 \cdot p_{атм} \cdot \frac{D_1}{2[\sigma]} = 1,1 \cdot 1,0 \cdot 10^5 \cdot \frac{3,2}{2 \cdot 267 \cdot 10^6} = 0,0007 \text{ м}.$$

Приймаємо $S_{н.ц.с}^R = S_{н.ц.с}^{R'} = 9 \text{ мм}.$

Виконавча товщина стінки за (23):

$$S_{н.ц.с} = 9 + 1,5 + 0 + 0 + 1,5 = 12 \text{ мм},$$

де $c_4 = 1,5 \text{ мм}.$

Допустимий тиск визначається за формулою (84), у якій:

$$[p]_{н.ц.с}^M = \frac{2[\sigma] \cdot (S_{н.ц.с} - c')}{D_1 + S_{н.ц.с} - c'} = \frac{2 \cdot 267 \cdot 10^6 \cdot (0,012 - 0,0015)}{3,2 + 0,012 - 0,0015} = 1,746 \cdot 10^6 \text{ Па},$$

$$[p]_{н.ц.с}^E = \frac{20,8 \cdot 10^{-6} \cdot E}{n \cdot B_1} \cdot H_{н.ц.с}^{-1} \cdot \left[\frac{100 \cdot (S_{н.ц.с} - c')}{D_1} \right]^{2,5}, \quad (91)$$

де коефіцієнт B_1 визначається за формулою (89) у якій:

$$B_1' = 1,0,$$

$$B_1'' = 9,45 \cdot \frac{D_1}{H_{н.ц.с}} \cdot \sqrt{\frac{D_1}{100 \cdot (S_{н.ц.с} - c')}} =$$

$$= 9,45 \cdot \frac{3,2}{1,89} \cdot \sqrt{\frac{3,2}{100 \cdot (0,012 - 0,0015)}} = 27,932.$$

Приймаємо $B_1 = B_1' = 1,0$, тоді:

$$[p]_{н.ц.с}^E = \frac{20,8 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \cdot 10^5 \cdot 10^6}{2,4 \cdot 1,0} \cdot \frac{3,2}{1,89} \cdot \left[\frac{100 \cdot (0,012 - 0,0015)}{3,2} \right]^{2,5} = 0,181 \cdot 10^6 \text{ Па}.$$

Підставимо отримані значення допустимих тисків у (84) і перевіримо, чи виконується співвідношення (24):

$$[p]_{н.ц.с} = \frac{1,746}{\sqrt{1 + \left(\frac{1,746}{0,181}\right)^2}} = 0,18 \text{ МПа};$$

0,18 МПа > 0,1 МПа – умова міцності виконується.

4.4.5.2.3 Розрахунок товщини стінки днища сепаратора

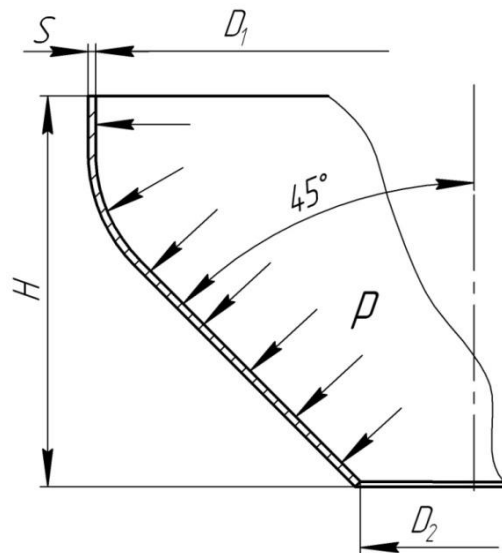


Рисунок 4.5 – Розрахункова схема для розрахунку товщини стінки конічного днища, що знаходиться під внутрішнім тиском

Для знаходження товщини стінки днища сепаратора необхідно визначити гідравлічний тиск, що діє на нього [11]:

$$p_{гд} = \rho \cdot g \cdot H_{дн} = 1261,8 \cdot 9,81 \cdot 1,49 = 0,018 \cdot 10^6 \text{ Па},$$

тоді тиск у апараті складатиме:

$$p_{дн.с} = p_1 + p_{гд} = 0,8 \cdot 10^5 + 0,018 \cdot 10^6 = 0,098 \cdot 10^6 \text{ Па}.$$

Оскільки внутрішній тиск на днище менший за атмосферний розрахункову товщину стінки днища сепаратора знаходимо за формулою (83) якщо:

$$H_E = \frac{D_1 - D_2}{2 \cdot \sin \alpha} = \frac{3,2 - 0,9}{2 \cdot \sin 45} = 1,627$$

$$D_E = \frac{D_1 - D_2}{2 \cdot \cos \alpha} = \frac{3,2 - 0,9}{2 \cdot \cos 45} = 1,627$$

тоді:

$$K_3^{\partial.c} = \frac{H_E}{D_E} = \frac{1,627}{1,627} = 1$$

$$K_1^{\partial.c} = \frac{n_y \cdot p_{атм}}{2,4 \cdot 10^{-6} \cdot E} = \frac{2,4 \cdot 1,0 \cdot 10^5}{2,4 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \cdot 10^5 \cdot 10^6} = 0,5$$

$$K_4^{\partial.c} = \frac{10^3 \cdot [\sigma]}{E} = \frac{10^3 \cdot 267 \cdot 10^6}{2 \cdot 10^5 \cdot 10^6} = 1,335$$

тоді: $K_2^{\partial.c} = 0,5$;

$$S_{\partial.c}^{R'} = K_2^{\partial.c} \cdot D_E \cdot 10^{-2} = 0,5 \cdot 1,627 \cdot 10^{-2} = 0,0081 \text{ м},$$

$$S_{\partial.c}^{R''} = 1,1 \cdot p_{атм} \cdot \frac{D_E}{2[\sigma]} = 1,1 \cdot 1,0 \cdot 10^5 \cdot \frac{1,627}{2 \cdot 267 \cdot 10^6} = 0,0003 \text{ м}.$$

Приймаємо $S_{\partial.c}^R = S_{\partial.c}^{R'} = 8,1 \text{ мм}.$

Виконавча товщина стінки за (23):

$$S_{\partial.c} = 8,1 + 1,5 + 0 + 0 + 0,4 = 10 \text{ мм},$$

де $c_4 = 0,4 \text{ мм}.$

Допустимий тиск визначається за формулою (84), у якій:

$$\begin{aligned} [p]_{\partial.c}^M &= \frac{2[\sigma] \cdot (S_{\partial.c} - c')}{\frac{D_E}{\cos \alpha} + S_{\partial.c} - c'} = \frac{2 \cdot 267 \cdot 10^6 \cdot (0,01 - 0,0015)}{\frac{1,627}{\cos 45} + 0,01 - 0,0015} = 1,965 \cdot 10^6 \text{ Па}, \\ [p]_{\partial.c}^E &= \frac{2,21 \cdot 10^{-5} \cdot E}{n_y} \cdot \left[\frac{100 \cdot (S_{\partial.c} - c')}{D_E^{\partial.c}} \right]^3 = \\ &= \frac{2,21 \cdot 10^{-5} \cdot 2 \cdot 10^5 \cdot 10^6}{2,4} \cdot \left[\frac{100 \cdot (0,01 - 0,0015)}{1,627} \right]^3 = 0,263 \cdot 10^6 \text{ Па}. \end{aligned}$$

Підставимо отримані значення допустимих тисків у (84), і перевіримо, чи виконується співвідношення (24):

$$[p]_{\partial,c} = \frac{1,965}{\sqrt{1 + \left(\frac{1,965}{0,263}\right)^2}} = 0,261 \text{ МПа};$$

0,261 МПа > 0,1 МПа – умова міцності виконується.

4.4.5.2.4 Розрахунок товщини стінки кришки сепаратора

Розрахункову товщину стінки кришки сепаратора (див. рисунок 17) знаходимо за формулою (87) у якій:

$$S_{\kappa,c}^{R'} = \frac{0,9 \cdot D_1}{510} \cdot \sqrt{\frac{n_y \cdot p}{10^{-6} \cdot E}} = \frac{0,9 \cdot 3,2}{510} \cdot \sqrt{\frac{2,4 \cdot 1,0 \cdot 10^5}{10^{-6} \cdot 2 \cdot 10^5 \cdot 10^6}} = 0,0062 \text{ м},$$

$$S_{\kappa,c}^{R''} = \frac{p \cdot D_1}{2[\sigma]} = \frac{1,0 \cdot 10^5 \cdot 3,2}{2 \cdot 267 \cdot 10^6} = 0,0006 \text{ м}.$$

Приймаємо $S_{\kappa,c}^R = S_{\kappa,c}^{R''} = 6,2 \text{ мм}.$

Виконавча товщина стінки кришки сепаратора за (23):

$$S_{\kappa,c} = 6,2 + 1,5 + 0 + 0 + 0,3 = 8 \text{ мм},$$

де $c_4 = 0,3 \text{ мм}.$

Допустимий тиск визначається за формулою (84), у якій:

$$[p]_{\kappa,c}^M = \frac{2[\sigma] \cdot (S_{\kappa,c} - c')}{D_1 + 0,5(S_{\kappa,c} - c')} = \frac{2 \cdot 267 \cdot 10^6 \cdot (0,008 - 0,0015)}{3,2 + 0,5 \cdot (0,008 - 0,0015)} = 1,084 \cdot 10^6 \text{ Па},$$

а допустимий тиск в умовах стійкості з умов пружності визначається за формулою (88) з урахуванням формули (89), у якій:

$$\chi'_{\kappa,c} = \frac{15 \cdot (S_{\kappa,c} - c')}{D_1} = \frac{15 \cdot (0,008 - 0,0015)}{3,2} = 0,03$$

тоді:

$$K_e^{\kappa,c} = \frac{1 + (2,4 + 8 \cdot 0,03) \cdot 0,03}{1 + (3 + 10 \cdot 0,03) \cdot 0,03} = 0,982;$$

$$[p]_{\kappa,c}^E = \frac{26 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \cdot 10^5 \cdot 10^6}{2,4} \cdot \left[\frac{100 \cdot (0,008 - 0,0015)}{0,982 \cdot 3,2} \right]^2 = 0,093 \cdot 10^6 \text{ Па}.$$

Підставимо отримані значення допустимих тисків у (84), і перевіримо чи виконується співвідношення (24):

$$[p]_{\kappa.c} = \frac{1,084}{\sqrt{1 + \left(\frac{1,084}{0,093}\right)^2}} = 0,093 \text{ МПа};$$

$0,093 \text{ МПа} < 0,1 \text{ МПа}$ – умова міцності не виконується.

Збільшимо товщину стінки до 10мм, тоді допустимий тиск визначається за формулою (84), у якій:

$$[p]_{\kappa.c}^M = \frac{2[\sigma] \cdot (S_{\kappa.c} - c')}{D_1 + 0,5(S_{\kappa.c} - c')} = \frac{2 \cdot 267 \cdot 10^6 \cdot (0,01 - 0,0015)}{3,2 + 0,5 \cdot (0,01 - 0,0015)} = 1,417 \cdot 10^6 \text{ Па},$$

а допустимий тиск в умовах стійкості з умов пружності визначається за формулою (88) з урахуванням формули (89), у якій:

$$\chi'_{\kappa.c} = \frac{15 \cdot (S_{\kappa.c} - c')}{D_1} = \frac{15 \cdot (0,01 - 0,0015)}{3,2} = 0,04$$

тоді:

$$K_e^{\kappa.c} = \frac{1 + (2,4 + 8 \cdot 0,04) \cdot 0,04}{1 + (3 + 10 \cdot 0,04) \cdot 0,04} = 0,976;$$

$$[p]_{\kappa.c}^E = \frac{26 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \cdot 10^5 \cdot 10^6}{2,4} \cdot \left[\frac{100 \cdot (0,01 - 0,0015)}{0,976 \cdot 3,2} \right]^2 = 0,161 \cdot 10^6 \text{ Па}.$$

Підставимо отримані значення допустимих тисків у (84), і перевіримо чи виконується співвідношення (24):

$$[p]_{\kappa.c} = \frac{1,417}{\sqrt{1 + \left(\frac{1,417}{0,161}\right)^2}} = 0,16 \text{ МПа};$$

$0,16 \text{ МПа} > 0,1 \text{ МПа}$ – умова міцності виконується.

4.4.5.3 Розрахунок товщини стінки циркуляційної труби

Для знаходження товщини стінки циркуляційної труби (див. рисунок 7) необхідно визначити гідравлічний тиск в ній:

$$p_{\text{ц.т.гд}} = \rho_p \cdot g \cdot H_{\text{ц.т}} = 1261,8 \cdot 9,81 \cdot 3,39 = 0,042 \cdot 10^6 \text{ Па},$$

тоді тиск у апараті складатиме:

$$p_{\text{ц.т}} = p_1 + p_{\text{ц.т.гд}} = 0,8 \cdot 10^5 + 0,042 \cdot 10^6 = 0,122 \cdot 10^6 \text{ Па}.$$

Розрахункова товщина стінки циркуляційної труби:

$$S_{\text{ц.т}}^R = \frac{p_{\text{ц.т}} \cdot D_2}{2[\sigma] \cdot \phi - p_{\text{ц.т}}} = \frac{0,122 \cdot 10^6 \cdot 0,9}{2 \cdot 267 \cdot 10^6 \cdot 0,95 - 0,122 \cdot 10^6} = 0,0002 \text{ м}.$$

Виконавча товщина стінки за (23):

$$S_{\text{ц.т}} = 0,2 + 1,5 + 0 + 0 + 0,3 = 2 \text{ мм},$$

де $c_4 = 0,3 \text{ мм}$.

Допустимий тиск [11]:

$$[p]_{\text{ц.т}} = \frac{2[\sigma] \cdot \phi \cdot (S_{\text{ц.т}} - c')}{D_2 + S_{\text{ц.т}} - c'} =$$

$$= \frac{2 \cdot 267 \cdot 10^6 \cdot 0,95 \cdot (0,002 - 0,0015)}{0,9 + 0,002 - 0,0015} = 0,282 \cdot 10^6 \text{ Па}.$$

За формулою (27) перевіримо, чи виконується умова міцності:

$$0,282 \text{ МПа} > 0,122 \text{ МПа} - \text{так, виконується.}$$

4.3.6 Розрахунок трубної решітки

Вихідні дані:

- діаметр гріючих труб $d = 38 \times 2 \text{ мм}$;
- крок розміщення труб $t = 48 \text{ мм}$;
- висота гріючих труб $H_{\text{мп}} = 4000 \text{ мм}$;
- площа поверхні теплообміну $F = 250 \text{ м}^2$;
- тиск у кожусі гріючої камери $p_{\kappa} = p_{\text{зн}} = 0,4 \text{ МПа}$;
- тиск у гріючих трубах $p_{\text{м}} = p_{\text{сп}} = 0,097 \text{ МПа}$;
- температура у кожусі гріючої камери $t_{\kappa} = t_{\text{зн}} = 143,62 \text{ }^{\circ}\text{C}$;
- температура у гріючих трубах $t_{\text{м}} = t_{\text{кин}} = 101,395 \text{ }^{\circ}\text{C}$;

- модуль пружності (Юнга) матеріалу стінки $E = 2 \cdot 10^5$ МПа;
- температурний коефіцієнт лінійного розширення матеріалу стінки $\alpha' = 15,7 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$.

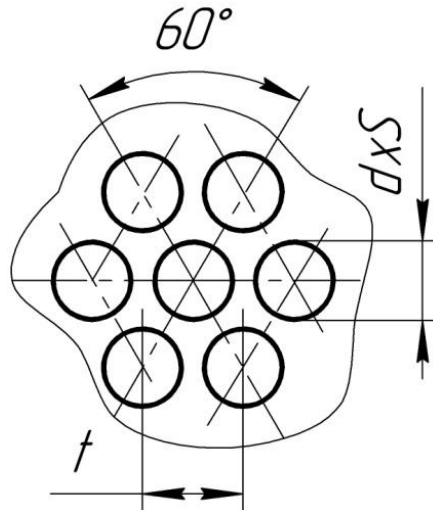


Рисунок 4.6 – Схема розміщення труб у трубній решітці гріючої камери

Зазор між трубами визначаємо із співвідношення [20]:

$$\delta = 0,866 \cdot t - d = 0,866 \cdot 48 - 38 = 3,568 \text{ мм.}$$

Кількість труб у трубній решітці:

$$n = \frac{F}{\pi \cdot d \cdot H_{mp}} = \frac{250}{3,14 \cdot 0,038 \cdot 4} = 524.$$

Кількість труб на стороні шестикутника:

$$a'' = \frac{3 + \sqrt{12 \cdot n - 3}}{6} = \frac{3 + \sqrt{12 \cdot 524 - 3}}{6} = 14.$$

Кількість труб на діагоналі шестикутника:

$$b'' = 2 \cdot a'' - 1 = 2 \cdot 14 - 1 = 27.$$

Розрахунковий діаметр кожуха [21]:

$$D' = (b'' - 1) \cdot t + d + 2 \cdot (t - d) =$$

$$= (27 - 1) \cdot 0,048 + 0,038 + 2(0,048 - 0,038) = 1,296 \text{ м, — що відповідає}$$

прийнятому раніше.

Осьове зусилля в апараті, що виникає під дією тиску:

$$\begin{aligned}
 Q' &= 0,785 \left(D^2 - n \cdot d^2 \right) \cdot p_{\kappa} + 0,785 \cdot n \cdot d^2 \cdot p_m = \\
 &= 0,785 \left(1,4^2 - 524 \cdot 0,038^2 \right) \cdot 0,4 \cdot 10^6 + \\
 &+ 0,785 \cdot 524 \cdot 0,034^2 \cdot 0,097 \cdot 10^5 = 0,424 \cdot 10^6 \text{ Н.}
 \end{aligned}$$

Площа поперечного перерізу стінок труб:

$$F_m = 0,785 \cdot n \cdot \left(d^2 - d^2 \right) = 0,785 \cdot 524 \cdot \left(0,038^2 - 0,034^2 \right) = 0,118 \text{ м}^2.$$

Площа поперечного перерізу кожуху:

$$F_{\kappa} = 0,785 \cdot \left(D^2 - D^2 \right) = 0,785 \cdot \left(1,408^2 - 1,4^2 \right) = 0,018 \text{ м}^2.$$

Осьове зусилля, що виникає під дією тиску в трубах [20]:

$$Q'_m = \frac{Q' \cdot F_m \cdot E_m}{F_{\kappa} \cdot E_{\kappa} + F_m \cdot E_m} = \frac{0,424 \cdot 10^6 \cdot 0,118 \cdot 2 \cdot 10^5 \cdot 10^6}{0,018 \cdot 2 \cdot 10^5 \cdot 10^6 + 0,118 \cdot 2 \cdot 10^5 \cdot 10^6} = 0,368 \cdot 10^6 \text{ Н,}$$

та в кожусі:

$$Q'_{\kappa} = \frac{Q' \cdot F_{\kappa} \cdot E_m}{F_{\kappa} \cdot E_{\kappa} + F_m \cdot E_m} = \frac{0,424 \cdot 10^6 \cdot 0,018 \cdot 2 \cdot 10^5 \cdot 10^6}{0,018 \cdot 2 \cdot 10^5 \cdot 10^6 + 0,118 \cdot 2 \cdot 10^5 \cdot 10^6} = 0,056 \cdot 10^6 \text{ Н.}$$

Напруження, що виникає під дією тиску в трубах:

$$\sigma'_m = \frac{Q'_m}{F_m} = \frac{0,368 \cdot 10^6}{0,118} = 3,119 \cdot 10^6 \text{ Па,}$$

і в кожусі:

$$\sigma'_{\kappa} = \frac{Q'_{\kappa}}{F_{\kappa}} = \frac{0,056 \cdot 10^6}{0,018} = 3,111 \cdot 10^6 \text{ Па.}$$

Осьове зусилля, що виникає в наслідок різниці температур в трубах [21]:

$$\begin{aligned}
 Q''_m &= \frac{(t_{\kappa} - t_m) \cdot \alpha'_{\kappa} \cdot F_{\kappa} \cdot F_m \cdot E}{F_{\kappa} + F_m} = \\
 &= - \frac{(101,395 - 143,62) \cdot 15,7 \cdot 10^{-6} \cdot 0,018 \cdot 0,118 \cdot 2 \cdot 10^5 \cdot 10^6}{0,018 + 0,118} = 2,071 \cdot 10^6 \text{ Н,}
 \end{aligned}$$

в кожусі:

$$Q''_{\kappa} = -Q''_m = -2,071 \cdot 10^6 \text{ Н.}$$

Напруження, що виникає внаслідок різниці температур в трубах:

$$\sigma_m'' = \frac{Q_m''}{F_m} = \frac{2,071 \cdot 10^6}{0,118} = 17,551 \cdot 10^6 \text{ Па},$$

в кожусі:

$$\sigma_\kappa'' = \frac{Q_\kappa''}{F_\kappa} = \frac{-2,071 \cdot 10^6}{0,018} = -115,056 \cdot 10^6 \text{ Па}.$$

Осьове зусилля, що виникає в трубах:

$$Q_m = Q_m' + Q_m'' = (0,368 + 2,071) \cdot 10^6 = 2,439 \cdot 10^6 \text{ Н},$$

в кожусі:

$$Q_\kappa = Q_\kappa' + Q_\kappa'' = (0,056 - 2,071) \cdot 10^6 = -2,015 \cdot 10^6 \text{ Н}.$$

Навантаження, що виникає в трубах [20]:

$$\sigma_m = \sigma_m' + \sigma_m'' = (3,119 + 17,551) \cdot 10^6 = 20,67 \cdot 10^6 \text{ Па},$$

в кожусі:

$$\sigma_\kappa = \sigma_\kappa' + \sigma_\kappa'' = (3,111 - 115,056) \cdot 10^6 = -111,945 \cdot 10^6 \text{ Па}.$$

Товщина трубної решітки:

$$S_{mp} = \frac{d_H}{8} + 0,005 = \frac{0,038}{8} + 0,005 = 0,01 \text{ м}.$$

Перевіримо товщину трубної решітки на згин ромбічної ділянки:

$$\begin{aligned} \sigma &= \frac{p_\kappa}{3,6 \left[1 - 0,7 \cdot \left(\frac{d_H}{t} \right) \right] \cdot \left(\frac{S_{mp}}{t} \right)^2} = \\ &= \frac{0,4 \cdot 10^6}{3,6 \cdot \left(1 - 0,7 \cdot \frac{0,038}{0,048} \right) \cdot \left(\frac{0,01}{0,048} \right)^2} = 5,742 \cdot 10^6 \text{ Па}, \text{ — тиск на} \end{aligned}$$

трубну решітку менший за допустимий.

4.3.7 Розрахунок фланцевих з'єднань випарного апарату

Вихідні дані:

- абсолютний тиск гріючої пари $p_{en} = 0,4 \text{ МПа}$;
- абсолютний тиск навколишнього середовища $p_{атм} = 0,1 \text{ МПа}$;

- абсолютний тиск у циркуляційній трубі $p_{um} = 0,122$ МПа;
- мінімальний тиск на прокладку $p_{np} = 35$ МПа;
- температура середовища в гріючій камері $t_{зк} = 143,62$ °С;
- температура середовища у сепараторі $t_1 = 93,52$ °С;
- температура середовища у циркуляційній трубі $t_k = 95,875$ °С;
- діаметр гріючої камери $D = 1,4$ м;
- діаметр сепаратора $D_1 = 3,2$ м;
- діаметр циркуляційної труби $D_2 = 0,9$ м;
- товщина стінки гріючої камери $S_{зк} = 4$ мм;
- товщина стінки сепаратора $S_c = 12$ мм;
- товщина стінки циркуляційної труби $S_{um} = 2$ мм;
- діаметр болта для фланцевого з'єднання гріючої камери $d_{\sigma}^{зк} = 20$ мм;
- діаметр болта для фланцевого з'єднання сепаратора $d_{\sigma}^c = 30$ мм;
- діаметр болта для фланцевого з'єднання циркуляційної труби $d_{\sigma}^{um} = 20$ мм;
- площа поперечного перерізу болта для фланцевого з'єднання гріючої камери $f_{\sigma}^{зк} = 2,35 \cdot 10^{-4}$ м²;
- площа поперечного перерізу болта для фланцевого з'єднання сепаратора $f_{\sigma}^c = 5,4 \cdot 10^{-4}$ м²;
- площа поперечного перерізу болта для фланцевого з'єднання циркуляційної труби $f_{\sigma}^{um} = 2,35 \cdot 10^{-4}$ м²;
- ширина прокладки для фланцевого з'єднання гріючої камери $b_{зк} = 20$ мм;
- ширина прокладки для фланцевого з'єднання сепаратора $b_c = 25$ мм;

- ширина прокладки для фланцевого з'єднання циркуляційної труби $b_{um} = 20$ мм;
- нормальний зазор між гайкою і втулкою $u = 6$ мм;
- додаток до розрахункової товщини стінки $c' = 1,5$ мм;
- допустиме напруження матеріалу фланця $[\sigma] = 267$ МПа;
- допустиме напруження матеріалу болта при 20°C $[\sigma]_{\sigma}^{20} = 140$ МПа;
- допустиме напруження матеріалу болта при температурі гріючої камери $[\sigma]_{\sigma}^{2K} = 132$ МПа;
- допустиме напруження матеріалу болта при температурі сепаратора $[\sigma]_{\sigma}^c = 135$ МПа;
- допустиме напруження матеріалу болта при температурі циркуляційної труби $[\sigma]_{\sigma}^{um} = 135$ МПа;
- допустимий тиск на прокладку $[p]_{np} = 130$ МПа;
- допустимий кут повороту фланцю $[\theta] = 0,026$ рад;
- модуль пружності (Юнга) матеріалу фланця $E = 2 \cdot 10^5$ МПа;
- модуль пружності матеріалу болта $E_{\sigma} = 1,99 \cdot 10^5$ МПа;
- модуль пружності матеріалу прокладки $E_n = 2000$ МПа;
- коефіцієнт жорсткості прокладки $k_{np} = 2,5$;
- коефіцієнт стискання прокладки $k_n = 1$;
- температурний коефіцієнт лінійного розширення матеріалу фланця $\alpha' = 15,7 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$;
- температурний коефіцієнт лінійного розширення матеріалу болта $\alpha'' = 12,2 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$.

У випарному апараті використовуються плоскі приверні фланці типу «шип-паз» з прокладкою прямокутного перерізу. Схема фланцевого з'єднання та

навантаження, що діють на фланець в період роботи зображені на рисунках 9 та 10 відповідно.

4.3.7.1 Розрахунок фланцевого з'єднання гріючої камери

Товщину стінки втулки фланця приймаємо, виходячи зі співвідношення (25): $S_0^{2K} = 14$ мм.

Товщина втулки біля основи фланця визначається за формулою (26), якщо: $\beta_1^{2K} = 1$ [12], тоді:

$$S_1^{2K} = 1 \cdot 14 = 14 \text{ мм.}$$

Висоту втулки визначимо за формулою [12]:

$$h_8^{2K} = 0,5 \cdot \sqrt{D \cdot (S_0^{2K} - c')} = 0,5 \cdot \sqrt{1400 \cdot (14 - 1,5)} = 66 \text{ мм.}$$

Еквівалентна товщина стінки втулки: $S_{екв}^{2K} = S_0^{2K} = 14$ мм.

Діаметр болтової окружності визначається за формулою (27):

$$D_0^{2K} = 1400 + 2 \cdot (2 \cdot 14 + 20 + 6) = 1508 \text{ мм.}$$

Зовнішній діаметр фланця знаходимо за формулою (28), якщо $a_{2K} = 40$ мм, тоді:

$$D_n^{2K} = 1508 + 40 = 1548 \text{ мм.}$$

Зовнішній діаметр прокладки за (29), якщо $e_{2K} = 30$ мм:

$$D_{nn}^{2K} = 1708 - 30 = 1478 \text{ мм.}$$

Середній діаметр прокладки за (30):

$$D_{cn}^{2K} = 1478 - 20 = 1458 \text{ мм.}$$

Кількість болтів, необхідна для забезпечення герметичності за (31), якщо:

$$t_{ui}^{2K} = 5 \cdot d_0^{2K} = 5 \cdot 20 = 100 \text{ мм,}$$

тоді кількість болтів буде рівна:

$$n_0^{2K} = \frac{3,14 \cdot 1508}{100} = 48.$$

Товщину фланця визначимо за формулою (32), якщо $\lambda_\phi^{2K} = 0,38$:

$$h_{\phi}^{2K} = 0,38 \cdot \sqrt{1400 \cdot 14} = 54 \text{ мм.}$$

Розрахункова довжина болта визначається за формулою (33). Для фланців типу “шип-паз”, при товщині прокладки $h_n^{2K} = 2$ мм, відстань між опорною поверхнею головки болта та гайки визначають за формулою (34):

$$l_{об}^{2K} \approx 2 \cdot (54 + 2) = 112 \text{ мм,}$$

а діаметр отвору під болт становить $d'_{2K} = 23$ мм, тоді розрахункова довжина болта:

$$l_{\phi}^{2K} = 115 + 0,28 \cdot 23 = 119 \text{ мм.}$$

Приймаємо $l_{\phi}^{2K} = 120$ мм.

Навантаження на фланець, яке виникає внаслідок дії тиску:

$$F_{Д}^{2K} = \frac{P_{2K} \cdot \pi \cdot (D_{2K}^{2K})^2}{4} = \frac{0,4 \cdot 10^6 \cdot 3,14 \cdot 1,458^2}{4} = 0,667 \cdot 10^6 \text{ Н.}$$

Реакція прокладки викликана тиском за формулою (35), якщо ефективна ширина прокладки:

$$b_0^{2K} = 0,12 \cdot \sqrt{b_{2K}^{2K}} = 0,12 \cdot \sqrt{0,02} = 0,017 \text{ м,}$$

тоді реакція прокладки буде рівна:

$$R_n^{2K} = 3,14 \cdot 1,458 \cdot 0,017 \cdot 2,5 \cdot 0,4 \cdot 10^6 = 0,078 \cdot 10^6 \text{ Н.}$$

Податливість прокладки визначається за формулою (36):

$$y_n^{2K} = \frac{1 \cdot 0,002}{2000 \cdot 10^6 \cdot 3,14 \cdot 1,458 \cdot 0,02} = 1,092 \cdot 10^{-11} \text{ м/Н.}$$

Кутова податливість фланця за (37). Попередньо визначемо:

$$\Psi_1^{2K} = 1,28 \lg \frac{D_H^{2K}}{D} = 1,28 \cdot \lg \frac{1,548}{1,4} = 0,056 ,$$

$$\lambda_{\phi}^{2K'} = \frac{h_{\phi}^{2K}}{\sqrt{D \cdot S_{екв}^{2K}}} = \frac{0,054}{\sqrt{1,4 \cdot 0,014}} = 0,38 ,$$

$$\Psi_2^{2K} = \frac{D_H^{2K} + D}{D_H^{2K} - D} = \frac{1,548 + 1,4}{1,548 - 1,4} = 19,919 .$$

тоді, за (38):

$$v_{\varepsilon K} = \frac{1}{1 + 0,9 \cdot 0,38 \cdot \left(1 + \frac{0,056 \cdot 0,054^2}{0,014^2} \right)} = 0,615.$$

З урахуванням коефіцієнтів, визначених вище, кутова податливість фланця становитиме:

$$y_{\phi}^{\varepsilon K} = \left[1 - 0,615 \cdot (1 + 0,9 \cdot 0,38) \right] \cdot \frac{19,919}{0,054^3 \cdot 2 \cdot 10^5 \cdot 10^6} = 0,116 \cdot 10^{-6} \text{ 1/Н м.}$$

Лінійна податливість болтів за (39):

$$y_{\bar{o}}^{\varepsilon K} = \frac{0,12}{1,99 \cdot 10^5 \cdot 10^6 \cdot 2,35 \cdot 10^{-4} \cdot 48} = 5,3 \cdot 10^{-11} \text{ м/Н.}$$

Коефіцієнт жорсткості фланцевого з'єднання:

$$k_{\varepsilon K}^{\varepsilon K} = \frac{y_{\bar{o}}^{\varepsilon K} + 0,5 \cdot y_{\phi}^{\varepsilon K} \cdot \left(D_{\bar{o}}^{\varepsilon K} - D - S_{\varepsilon K}^{\varepsilon K} \right) \cdot \left(D_{\bar{o}}^{\varepsilon K} - D_{\text{cn}}^{\varepsilon K} \right)}{y_n^{\varepsilon K} + y_{\bar{o}}^{\varepsilon K} + 0,5 \cdot y_{\phi}^{\varepsilon K} \cdot \left(D_{\bar{o}}^{\varepsilon K} - D_{\text{cn}}^{\varepsilon K} \right)^2} =$$

$$= \frac{5,3 \cdot 10^{-11} + 0,5 \cdot 0,116 \cdot 10^{-6} \cdot (1,508 - 1,4 - 0,014) \cdot (1,508 - 1,458)}{1,092 \cdot 10^{-11} + 5,3 \cdot 10^{-11} + 0,5 \cdot 0,116 \cdot 10^{-6} \cdot (1,508 - 1,458)^2} = 1,558$$

Зусилля, що виникає у фланці внаслідок температурних деформацій за (40, якщо):

$$t_{\phi}^{\varepsilon K} = 0,96 \cdot t_{\text{cn}} = 0,96 \cdot 143,62 = 137,88^{\circ}\text{C},$$

$$t_{\bar{o}}^{\varepsilon K} = 0,95 \cdot t_{\text{cn}} = 0,95 \cdot 143,62 = 136,44^{\circ}\text{C},$$

тоді:

$$F_t^{\varepsilon K} = \frac{5,3 \cdot 10^{-11} \cdot 48 \cdot 2,35 \cdot 10^{-4} \cdot 1,99 \cdot 10^5 \cdot 10^6}{1,092 \cdot 10^{-11} + 5,3 \cdot 10^{-11} + 0,5 \cdot 0,126 \cdot 10^{-6} \cdot (1,508 - 1,458)^2} \times$$

$$\times (15,7 \cdot 10^{-6} \cdot 137,88 - 12,2 \cdot 10^{-6} \cdot 136,44) = 0,285 \cdot 10^6 \text{ Н.}$$

Зусилля, що виникає у болтах в умовах монтажу знаходимо відповідно до співвідношення (41):

$$F_{\bar{o}1}^{\varepsilon K'} = k_{\varepsilon K}^{\varepsilon K} \cdot F_{\text{Д}}^{\varepsilon K} + R_n^{\varepsilon K} = 1,558 \cdot 0,667 \cdot 10^6 + 0,078 \cdot 10^6 = 1,117 \cdot 10^6 \text{ Н;}$$

$$F_{\bar{o}1}^{\varepsilon K''} = 0,5 \cdot 3,14 \cdot 1,458 \cdot 0,017 \cdot 35 \cdot 10^6 = 1,362 \cdot 10^6 \text{ Н;}$$

$$F_{\bar{o}1}^{\varepsilon K'''} = 0,4 \cdot [\sigma]_{\bar{o}}^{20} \cdot n_{\bar{o}}^{\varepsilon K} \cdot f_{\bar{o}}^{\varepsilon K} = 0,4 \cdot 140 \cdot 10^6 \cdot 48 \cdot 2,35 \cdot 10^{-4} = 0,632 \cdot 10^6 \text{ Н.}$$

Приймаємо:

$$F_{\sigma 1}^{2K} = F_{\sigma 1}^{2K''} = 1,362 \cdot 10^6 \text{ Н.}$$

Зусилля на болти під час роботи апарату [12]:

$$\begin{aligned} F_{\sigma 2}^{2K} &= F_{\sigma 1}^{2K} + (1 - k_{жс}^{2K}) \cdot F_D^{2K} + F_t^{2K} = \\ &= 1,362 \cdot 10^6 + (1 - 1,558) \cdot 0,667 \cdot 10^6 + 0,285 \cdot 10^6 = 1,275 \cdot 10^6 \text{ Н.} \end{aligned}$$

Умова міцності болтів у період монтажу за співвідношенням (43)

$$\frac{F_{\sigma 1}^{2K}}{n_{\sigma}^{2K} \cdot f_{\sigma}^{2K}} = \frac{1,362 \cdot 10^6}{48 \cdot 2,35 \cdot 10^{-4}} = 120,745 \cdot 10^6 \text{ Па} < 140 \text{ МПа} - \text{ умова}$$

виконується.

Умова міцності болтів під час роботи за (44):

$$\frac{F_{\sigma 2}^{2K}}{n_{\sigma}^{2K} \cdot f_{\sigma}^{2K}} = \frac{1,275 \cdot 10^6}{48 \cdot 2,35 \cdot 10^{-4}} = 113,032 \cdot 10^6 \text{ Па} < 132 \text{ МПа} -$$

умова міцності виконується.

Умова міцності прокладки відповідно до співвідношення (45), у якому:

$$F_{\sigma \max}^{2K} = \max \left\{ \begin{matrix} F_{\sigma 1}^{2K} \\ F_{\sigma 2}^{2K} \end{matrix} \right\} = F_{\sigma 1}^{2K} = 1,362 \cdot 10^6 \text{ Н,}$$

тоді:

$$\frac{F_{\sigma \max}^{2K}}{\pi \cdot D_{cn}^{2K} \cdot b_{2K}} = \frac{1,362 \cdot 10^6}{3,14 \cdot 1,458 \cdot 0,02} = 14,875 \cdot 10^6 \text{ Па} < 130 \text{ МПа} - \text{ умова}$$

міцності виконується.

Умова міцності втулки фланця, обмеженої розміром S_0 , визначається за формулою (46), з урахуванням, що $f_{\phi}^{2K} = 1$, при

$$X_{2K} = \frac{h_e^{2K}}{\sqrt{D \cdot S_0^{2K}}} = \frac{0,066}{\sqrt{1,4 \cdot 0,014}} = 0,471, \text{ тоді:}$$

$$T_H^{2K} = \frac{\left(D_H^{2K} \right)^2 \cdot \left(1 + 8,55 \cdot \lg \frac{D_H^{2K}}{D} \right) - D^2}{\left(1,05 \cdot D^2 + 1,945 \cdot \left(D_H^{2K} \right)^2 \right) \cdot \left(\frac{D_H^{2K}}{D} - 1 \right)} =$$

$$1,548^2 \cdot \left(1 + 8,55 \cdot \lg \frac{1,548}{1,4} \right) - 1,4^2$$

$$= \left(\frac{1,548}{1,4} - 1 \right) \cdot \left(\frac{1,548}{1,4} - 1 \right) = 1,874,$$

Значення кутового моменту знаходимо зі співвідношення (49), у якому:

$$M_0^{\varepsilon K'} = 0,5 \cdot \left(D_{\bar{\sigma}}^{\varepsilon K} - D_{cn}^{\varepsilon K} \right) \cdot F_{\bar{\sigma}1}^{\varepsilon K} = 0,5 \cdot (1,508 - 1,458) \cdot 1,362 \cdot 10^6 = 0,034 \cdot 10^6 \text{ Н м},$$

$$M_0^{\varepsilon K''} = 0,5 \cdot \left[\left(D_{\bar{\sigma}}^{\varepsilon K} - D_{cn}^{\varepsilon K} \right) \cdot F_{\bar{\sigma}2}^{\varepsilon K} + \left(D_{cn}^{\varepsilon K} - D - S_{екв}^{\varepsilon K} \right) \cdot F_{Д}^{\varepsilon K} \right] \cdot \frac{[\sigma]_{\bar{\sigma}}^{20}}{[\sigma]_{\bar{\sigma}}^{\varepsilon K}} =$$

$$= 0,5 \cdot \left[(1,508 - 1,458) \cdot 1,275 \cdot 10^6 + (1,458 - 1,4 - 0,014) \cdot 0,667 \cdot 10^6 \right] \times$$

$$\times \frac{140 \cdot 10^6}{132 \cdot 10^6} = 0,049 \cdot 10^6 \text{ Н м}.$$

Приймаємо: $M_0^{\varepsilon K} = M_0^{\varepsilon K''} = 0,049 \cdot 10^6 \text{ Н м}$, $D^* = D = 1,4 \text{ м}$, тому що:

$$20 \cdot S_1^{\varepsilon K} = 20 \cdot 0,014 = 0,28 \text{ м} < 1,4 \text{ м}.$$

З урахуванням параметрів, визначених вище, за (48) знайдемо:

$$\sigma_1^{\varepsilon K} = \frac{1,874 \cdot 0,049 \cdot 10^6 \cdot 0,615}{1,4 \cdot (0,014 - 0,0015)^2} = 258,162 \cdot 10^6 \text{ Па}.$$

Підставимо дане значення в (47) і отримаємо:

$$\sigma_0^{\varepsilon K} = 1 \cdot 258,162 = 258,162 \text{ МПа}.$$

$$\sigma_t^{\varepsilon K} = \frac{p_{\varepsilon n} \cdot D}{2 \cdot (S_0^{\varepsilon K} - c')} = \frac{0,4 \cdot 10^6 \cdot 1,4}{2 \cdot (0,014 - 0,0015)} = 22,4 \cdot 10^6 \text{ Па}.$$

$$\sigma_m^{\varepsilon K} = \frac{p_{\varepsilon n} \cdot D}{4 \cdot (S_0^{\varepsilon K} - c')} = \frac{0,4 \cdot 10^6 \cdot 1,4}{4 \cdot (0,014 - 0,0015)} = 11,2 \cdot 10^6 \text{ Па}.$$

$$[\sigma]_0 = 0,003 \cdot E = 0,003 \cdot 2 \cdot 10^5 = 600 \text{ МПа}.$$

$$[\sigma]_0 \cdot \varphi = 600 \cdot 0,95 = 570 \text{ МПа}.$$

Розрахуємо напруження у втулці та перевіримо виконання умови міцності [11]:

$$\sqrt{(\sigma_0^{\varepsilon K} + \sigma_m^{\varepsilon K})^2 + (\sigma_t^{\varepsilon K})^2 - (\sigma_0^{\varepsilon K} + \sigma_m^{\varepsilon K}) \cdot \sigma_t^{\varepsilon K}} =$$

$$= \sqrt{(258,162 + 11,2)^2 + 22,4^2 - (258,162 + 11,2) \cdot 22,4} = 258,89 \text{ МПа} < 570 \text{ МПа} - \text{умова міцності виконується.}$$

Умову герметичності фланцевого з'єднання розрахуємо за формулою (50), у якій:

$$\sigma_{\kappa}^{2\kappa} = \frac{M_0}{\left[1 - \frac{\nu_{2\kappa}}{1 + 0,9 \cdot \lambda_{\phi}^{2\kappa}} \right]} \cdot \frac{\psi_{2\kappa}}{D \cdot (h_{\phi}^{2\kappa})^2} = 0,049 \cdot 10^6 \cdot \left[1 - 0,615 \cdot (1 + 0,9 \cdot 0,38) \right] \cdot \frac{19,919}{1,4 \cdot 0,054^2} = 41,761 \cdot 10^6 \text{ Па,}$$

тоді умова герметичності матиме вигляд:

$$\theta_{2\kappa} = \frac{41,761 \cdot 10^6}{2 \cdot 10^5 \cdot 10^6} \cdot \frac{1,4}{0,054} = 0,0054 \text{ рад} < 0,026 \text{ рад} - \text{умова}$$

виконується.

4.3.7.2 Розрахунок фланцевого з'єднання сепаратора

Розрахункова схема фланцевого з'єднання зображена на рисунку 9 та 10.

Товщину стінки втулки фланця, приймаємо виходячи з умови (25): $S_0^c = 16 \text{ мм}$.

Товщина втулки біля основи фланця визначається за формулою (26), якщо $\beta_1^c = 1$:

$$S_1^c = 1 \cdot 16 = 16 \text{ мм.}$$

Висоту втулки визначимо за формулою:

$$h_{\phi}^c = 0,5 \cdot \sqrt{D_1 \cdot (S_0^c - c')} = 0,5 \cdot \sqrt{3200 \cdot (16 - 1,5)} = 108 \text{ мм.}$$

Еквівалентна товщина стінки втулки: $S_{\text{екв}}^c = S_0^c = 16 \text{ мм}$.

Діаметр болтової окружності визначається за формулою (27):

$$D_{\phi}^c = 3200 + 2 \cdot (2 \cdot 16 + 30 + 6) = 3336 \text{ мм.}$$

Зовнішній діаметр фланця знаходимо за формулою (28), якщо $a = 58 \text{ мм}$:

$$D_{\text{н}}^c = 3336 + 58 = 3394 \text{ мм.}$$

Зовнішній діаметр прокладки за (29), де $e = 41 \text{ мм}$, тоді:

$$D_{\text{нп}}^c = 3336 - 41 = 3295 \text{ мм.}$$

Середній діаметр прокладки за формулою (30):

$$D_{\text{сн}}^c = 3295 - 25 = 3270 \text{ мм.}$$

Кількість болтів, необхідна для забезпечення герметичності, знайдемо за формулою (31), якщо крок розміщення болтів:

$$t_{\text{ш}}^c = 5 \cdot d_{\text{б}}^c = 5 \cdot 30 = 150 \text{ мм,}$$

тоді кількість болтів буде рівна:

$$n_{\text{б}}^c = \frac{3,14 \cdot 3336}{150} = 70.$$

Товщину фланця визначимо за формулою (32), якщо $\lambda_{\phi}^c = 0,38$:

$$h_{\phi}^c = 0,38 \cdot \sqrt{3200 \cdot 16} = 86 \text{ мм.}$$

Розрахункова довжина болта визначається за формулою (33). Для фланців типу “шип-паз”, при товщині прокладки $h_{\text{н}}^c = 3 \text{ мм}$, відстань між опорною поверхнею головки болта і гайки визначається за формулою (34), тоді:

$$l_{\text{оо}}^c \approx 2 \cdot (86 + 3) = 178 \text{ мм,}$$

а діаметр отвору під болт $d_c' = 33 \text{ мм}$, тоді, розрахункова довжина болта:

$$l_{\text{б}}^c = 178 + 0,28 \cdot 33 = 187,24 \text{ мм.}$$

Приймаємо: $l_{\text{б}}^c = 190 \text{ мм}$.

Навантаження на фланець, яке виникає унаслідок дії тиску:

$$F_{\text{Д}}^c = \frac{P_{\text{атм}} \cdot \pi \cdot (D_{\text{сн}}^c)^2}{4} = \frac{0,1 \cdot 10^6 \cdot 3,14 \cdot 3,27^2}{4} \quad 6$$

Реакція прокладки викликана тиском за формулою (35), якщо ефективна ширина прокладки:

$$b_0^c = 0,12 \cdot \sqrt{b_c} = 0,12 \cdot \sqrt{0,025} = 0,019 \text{ м,}$$

тоді реакція прокладки буде рівна:

$$R_n^c = 3,14 \cdot 3,27 \cdot 0,019 \cdot 2,5 \cdot 0,1 \cdot 10^6 = 0,049 \cdot 10^6 \text{ Н.}$$

Податливість прокладки визначається за формулою (36):

$$y_n^c = \frac{1 \cdot 0,003}{2000 \cdot 10^6 \cdot 3,14 \cdot 3,27 \cdot 0,025} = 0,584 \cdot 10^{-11} \text{ м/Н.}$$

Кутову податливість фланця визначаємо за (37). Попередньо визначимо:

$$\psi_1^c = 1,28 \cdot \lg \frac{D}{D_1} = 1,28 \cdot \lg \frac{3,394}{3,2} = 0,033,$$

$$\lambda_{\phi'}^c = \frac{h_{\phi}^c}{\sqrt{D_1 \cdot S_{екв}^c}} = \frac{0,086}{\sqrt{3,2 \cdot 0,016}} = 0,38,$$

$$\psi_2^c = \frac{D^c + D_1}{D^c - D_1} = \frac{3,394 + 3,2}{3,394 - 3,2} = 33,99,$$

тоді, за (38):

$$\nu_c = \frac{1}{1 + 0,9 \cdot 0,38 \cdot \left(\frac{0,033 \cdot 0,086^2}{1 + \frac{0,016^2}{0,033^2}} \right)} = 0,6.$$

З урахування коефіцієнтів, визначених вище, кутова податливість фланця становитиме:

$$y_{\phi}^c = [1 - 0,6 \cdot (1 + 0,9 \cdot 0,38)] \cdot \frac{33,99}{0,086^3 \cdot 2 \cdot 10^5 \cdot 10^6} = 0,52 \cdot 10^{-7} \text{ 1/Н м.}$$

Лінійна податливість болтів за формулою (39):

$$y_o^c = \frac{0,19}{1,99 \cdot 10^5 \cdot 10^6 \cdot 5,4 \cdot 10^{-4} \cdot 70} = 5,524 \cdot 10^{-11} \text{ м/Н.}$$

Коефіцієнт жорсткості фланцевого з'єднання:

$$k^c = \frac{y_{\phi}^c + 0,5 \cdot y_{\phi}^c \cdot (D_{\phi}^c - D_1 - S_{екв}^c)(D_{\phi}^c - D_{cn}^c)}{y_n^c + y_o^c + 0,5 \cdot y_{\phi}^c \cdot (D_o^c - D_{cn}^c)^2} =$$

$$= \frac{2,526 \cdot 10^{-11} + 0,5 \cdot 0,52 \cdot 10^{-7} \cdot (3,336 - 3,2 - 0,016)(3,336 - 3,27)}{0,584 \cdot 10^{-11} + 2,526 \cdot 10^{-11} + 0,5 \cdot 0,52 \cdot 10^{-7} \cdot (3,336 - 3,27)^2} = 1,601$$

Зусилля, що виникає у фланці внаслідок температурних деформацій, визначаємо за формулою (40), якщо:

$$t_{\phi}^c = 0,96 \cdot t_1 = 0,96 \cdot 93,52 = 89,779^{\circ} \text{C},$$

$$t_{\bar{o}}^c = 0,95 \cdot t_1 = 0,95 \cdot 93,52 = 88,844^{\circ} \text{C},$$

тоді:

$$F_t^c = \frac{2,526 \cdot 10^{-11} \cdot 70 \cdot 5,4 \cdot 10^{-4} \cdot 1,99 \cdot 10^5 \cdot 10^6}{0,584 \cdot 10^{-11} + 2,526 \cdot 10^{-11} + 0,5 \cdot 0,52 \cdot 10^{-7} \cdot (3,336 - 3,27)^2} \times \\ \times (15,7 \cdot 10^{-6} \cdot 89,779 - 12,2 \cdot 10^{-6} \cdot 88,844) = 0,429 \cdot 10^6 \text{ Н}.$$

Зусилля, що виникає у болтах в умовах монтажу, знаходимо відповідно до співвідношення (41), у якому:

$$F_{\bar{o}1}^{c'} = k_{\text{жс}}^c \cdot F_{\text{Д}}^c + R_n^c = 1,601 \cdot 0,839 \cdot 10^6 + 0,049 \cdot 10^6 = 1,139 \cdot 10^6 \text{ Н};$$

$$F_{\bar{o}1}^{c''} = 0,5 \cdot 3,14 \cdot 3,27 \cdot 0,019 \cdot 35 \cdot 10^6 = 3,414 \cdot 10^6 \text{ Н};$$

$$F_{\bar{o}1}^{c'''} = 0,4 \cdot [\sigma]^{20} \cdot n_{\bar{o}}^c \cdot f_{\bar{o}}^c = 0,4 \cdot 140 \cdot 10^6 \cdot 70 \cdot 5,4 \cdot 10^{-4} = 2,117 \cdot 10^6 \text{ Н}.$$

Приймаємо: $F_{\bar{o}1}^c = F_{\bar{o}1}^{c''} = 3,414 \cdot 10^6 \text{ Н}.$

Зусилля на болти під час роботи апарату:

$$F_{\bar{o}2}^c = F_{\bar{o}1}^c + (1 - k_{\text{жс}}^c) \cdot F_{\text{Д}}^c + F_t^c = 3,414 + (1 - 1,601) \cdot 0,839 + 0,429 = 3,339 \text{ МН}.$$

Умова міцності болтів у період монтажу за співвідношенням (43)

$$\frac{F_{\bar{o}1}^c}{n_{\bar{o}}^c \cdot f_{\bar{o}}^c} = \frac{3,314 \cdot 10^6}{70 \cdot 5,4 \cdot 10^{-4}} = 87,672 \cdot 10^6 \text{ Па} < 210 \text{ МПа} \quad -$$

умова виконується.

Умова міцності болтів під час роботи за співвідношенням (44):

$$\frac{F_{\bar{o}2}^c}{n_{\bar{o}}^c \cdot f_{\bar{o}}^c} = \frac{3,329 \cdot 10^6}{70 \cdot 5,4 \cdot 10^{-4}} = 88,333 \cdot 10^6 \text{ Па} < 202 \text{ МПа} \quad -$$

умова міцності виконується.

Умова міцності прокладки відповідно до співвідношення (45), у якому:

$$F_{\bar{o} \max}^c = \max \left\{ \begin{matrix} F_{\bar{o}1}^c \\ F_{\bar{o}2}^c \end{matrix} \right\} = F_{\bar{o}2}^c = 3,339 \cdot 10^6 \text{ Н},$$

тоді:

$$\frac{F_{\sigma_{\max}}^c}{\pi \cdot D_{cn}^c \cdot b_c} = \frac{3,339 \cdot 10^6}{3,14 \cdot 3,27 \cdot 0,025} = 13,008 \cdot 10^6 \text{ Па} < 130 \text{ МПа} -$$

умова міцності виконується.

Умова міцності втулки фланця, обмеженої розміром S_0 , визначається за

формулою (46), $f_{\phi}^c = 1$ при $x_c = \frac{h^c}{\sqrt{D_1 \cdot S_0^c}} = \frac{0,108}{\sqrt{3,2 \cdot 0,016}} = 0,478$, тоді:

$$T_{\text{н}}^c = \frac{(D_{\text{н}}^c)^2 \left(1 + 8,55 \cdot \lg \frac{D_{\text{н}}^c}{D_1} \right) - D_1^2}{\left(1,05 \cdot D_1^2 + 1,945 \cdot (D_{\text{н}}^c)^2 \right) \cdot \left(\frac{D_{\text{н}}^c}{D_1} - 1 \right)} =$$

$$\frac{3,394^2 \cdot \left(1 + 8,55 \cdot \lg \frac{3,394}{3,2} \right) - 3,2^2}{\left(1,05 \cdot 3,2^2 + 1,945 \cdot 3,394^2 \right) \cdot \left(\frac{3,394}{3,2} - 1 \right)} = 1,89.$$

Значення крутного моменту знаходимо зі співвідношення (49), у якому:

$$M_0^{c'} = 0,5 \cdot (D_{\sigma}^c - D_{cn}^c) \cdot F_{\sigma 1}^c = 0,5 \cdot (3,336 - 3,27) \cdot 3,314 \cdot 10^6 = 0,109 \cdot 10^6 \text{ Н м},$$

$$M_0^{c''} = 0,5 \cdot \left[(D_{\sigma}^c - D_{cn}^c) \cdot F_{\sigma 2}^c + (D_{cn}^c - D_1 - S_{екв}^c) \cdot F_{\sigma Д}^c \right] \cdot \frac{[\sigma]_{\sigma}^{20}}{[\sigma]_{\sigma}^c} =$$

$$= 0,5 \cdot \left[(3,336 - 3,27) \cdot 3,339 \cdot 10^6 + (3,27 - 3,2 - 0,016) \cdot 0,839 \cdot 10^6 \right] \cdot \frac{140 \cdot 10^6}{135 \cdot 10^6} =$$

$$= 0,138 \cdot 10^6 \text{ Н м}.$$

Приймаємо: $M_0^c = M_0^{c''} = 0,138 \cdot 10^6 \text{ Н м}$, $D_1^* = D_1 = 3,2 \text{ м}$, тому що:

$$20 \cdot S_1^c = 20 \cdot 0,016 = 0,32 \text{ м} < 4,5 \text{ м}.$$

З урахуванням параметрів, визначених вище, за (48) знайдемо:

$$\sigma_1^c = \frac{0,89 \cdot 0,138 \cdot 10^6 \cdot 0,6}{3,2 \cdot (0,016 - 0,0015)^2} = 109,53 \cdot 10^6 \text{ Па}.$$

Підставимо отримане значення в (47) і отримаємо:

$$\sigma_0^c = 1 \cdot 109,53 = 109,53 \text{ МПа}.$$

$$\sigma_t^c = \frac{P}{2 \cdot (S_0^c - c')} \cdot D = \frac{0,1 \cdot 10^6 \cdot 3,2}{2 \cdot (0,016 - 0,0015)} = 11,034 \cdot 10^6 \text{ Па.}$$

$$\sigma_m^c = \frac{P}{4 \cdot (S_0^c - c')} \cdot D = \frac{0,1 \cdot 10^6 \cdot 3,2}{4 \cdot (0,016 - 0,0015)} = 5,517 \cdot 10^6 \text{ Па.}$$

Розрахуємо напруження у втулці та перевіримо виконання умови міцності:

$$\sqrt{(\sigma_0^c + \sigma_m^c)^2 + (\sigma_t^c)^2 - (\sigma_0^c + \sigma_m^c) \cdot \sigma_t^c} =$$

$$= \sqrt{(109,53 + 5,517)^2 + 11,034^2 - (109,53 + 5,517) \cdot 11,034} = 109,946 \text{ МПа} <$$

$$< 570 \text{ МПа} - \text{умова міцності виконується.}$$

Умову герметичності фланцевого з'єднання розраховуємо за формулою (50), у якій:

$$\sigma_\kappa^c = \frac{c}{M_0} \cdot \left[\frac{-v}{1} \cdot \left(1 + \frac{\lambda^{c'}}{0,9} \right) \right] \cdot \frac{\Psi^c}{D_1 \cdot (h_\phi^c)^2} =$$

$$= 0,138 \cdot 10^6 \cdot [1 - 0,6 \cdot (1 + 0,9 \cdot 0,38)] \cdot \frac{33,99}{3,2 \cdot 0,086^2} = 38,608 \cdot 10^6 \text{ Па,}$$

тоді умова міцності матиме вигляд:

$$\theta_c = \frac{38,608 \cdot 10^6}{2 \cdot 10^5 \cdot 10^6} \cdot \frac{3,2}{0,086} = 0,0072 \text{ рад} < 0,013 \text{ рад} - \text{умова}$$

виконується.

4.3.7.3 Розрахунок фланцевого з'єднання циркуляційної труби

Розрахункова схема фланцевого з'єднання зображена на рисунку 9 та 10.

Товщину стінки втулки фланця приймаємо виходячи з умови (25):
 $S_0^{um} = 12 \text{ мм.}$

Товщина втулки біля основи фланця визначається за формулою (26), у якій $\beta_1^{um} = 1$, тоді:

$$S_1^{um} = 1 \cdot 12 = 12 \text{ мм.}$$

Висоту втулки визначимо за формулою:

$$h_6^{um} = 0,5 \cdot \sqrt{D_2 \cdot (S_0^{um} - c')} = 0,5 \cdot \sqrt{900 \cdot (12 - 1,5)} = 49 \text{ мм.}$$

Еквівалентна товщина стінки втулки: $S_{екв}^{um} = S_0^{um} = 12 \text{ мм.}$

Діаметр болтової окружності визначається за формулою (27):

$$D_o^{um} = 900 + 2 \cdot (2 \cdot 12 + 20 + 6) = 1000 \text{ мм.}$$

Зовнішній діаметр фланця знаходимо за формулою (28), у якій $a_{um} = 40 \text{ мм.}$

$$D_n^{um} = 1000 + 40 = 1040 \text{ мм.}$$

Зовнішній діаметр прокладки за (29), якщо $e_{um} = 30 \text{ мм.}$

$$D_{nn}^{um} = 1000 - 30 = 970 \text{ мм.}$$

Середній діаметр прокладки визначаємо за формулою (30):

$$D_{cn}^{um} = 970 - 20 = 950 \text{ мм.}$$

Кількість болтів, необхідна для забезпечення герметичності за (31), якщо крок розміщення болтів:

$$t_{ui}^{um} = 5 \cdot d_o^{um} = 5 \cdot 20 = 100 \text{ мм,}$$

тоді:

$$n_o^{um} = \frac{3,14 \cdot 1000}{100} = 31.$$

Товщину фланця визначимо за формулою (32), якщо $\lambda_{\phi}^{um} = 0,38$:

$$h_{\phi}^{um} = 0,38 \cdot \sqrt{900 \cdot 12} = 39 \text{ мм.}$$

Розрахункова довжина болта визначається за формулою (33), у якій $l_{об}^{um}$ знаходимо з (34), якщо $h_n^{um} = 2 \text{ мм,}$

$$l_{об}^{um} \approx 2 \cdot (39 + 2) = 82 \text{ мм.}$$

У формулі (33) діаметр отвору під болт $d_{um}' = 23 \text{ мм,}$ тоді розрахункова довжина болта:

$$l_o^{um} = 82 + 0,28 \cdot 23 = 88,44 \text{ мм.}$$

Приймаємо $l_6^{um} = 90$ мм.

Навантаження на фланець, яке виникає внаслідок дії тиску:

$$F_{\text{Д}}^{um} = \frac{p_{um} \cdot \pi \cdot (D_{cn}^{um})^2}{4} = \frac{0,122 \cdot 10^6 \cdot 3,14 \cdot 0,95^2}{4} = 0,086 \cdot 10^6 \text{ Н.}$$

Реакція прокладки викликана тиском за (35), якщо і ефективна ширина прокладки:

$$b_0^{um} = 0,12 \cdot \sqrt{b_{um}} = 0,12 \cdot \sqrt{0,02} = 0,017 \text{ м,}$$

тоді реакція рівна:

$$R_n^{um} = 3,14 \cdot 0,95 \cdot 0,017 \cdot 2,5 \cdot 0,122 \cdot 10^6 = 0,015 \cdot 10^6 \text{ Н.}$$

Податливість прокладки визначається за формулою (36):

$$y_n^{um} = \frac{1 \cdot 0,002}{2000 \cdot 10^6 \cdot 3,14 \cdot 0,95 \cdot 0,02} = 1,676 \cdot 10^{-11} \text{ м/Н.}$$

Кутова податливість фланця за (37), якщо:

$$\psi_1^{um} = 1,28 \cdot \lg \frac{D_n^{um}}{D_2} = 1,28 \cdot \lg \frac{1,04}{0,9} = 0,08,$$

$$\lambda_{\phi}^{um} = \frac{h_{\phi}^{um}}{\sqrt{D_2 \cdot S_{екв}^{um}}} = \frac{0,039}{\sqrt{0,9 \cdot 0,012}} = 0,38,$$

$$\psi_2^{um} = \frac{D_n^{um} + D_2}{D_n^{um} - D_2} = \frac{1,04 + 0,9}{1,04 - 0,9} = 13,857,$$

за формулою (38):

$$v_{um} = \frac{1}{1 + 0,9 \cdot 0,38 \cdot \left(1 + \frac{0,08 \cdot 0,039^2}{0,012^2} \right)} = 0,613,$$

тоді:

$$y_{\phi}^{um} = \left[1 - 0,613 \cdot (1 + 0,9 \cdot 0,38) \right] \cdot \frac{13,857}{0,039^3 \cdot 2 \cdot 10^5 \cdot 10^6} = 0,207 \cdot 10^{-6} \text{ 1/Н м.}$$

Лінійна податливість болтів за (39):

$$y_6^{um} = \frac{0,09}{1,99 \cdot 10^5 \cdot 10^6 \cdot 2,35 \cdot 10^{-4} \cdot 31} = 6,208 \cdot 10^{-11} \text{ м/Н.}$$

Коефіцієнт жорсткості фланцевого з'єднання:

$$k_{ж}^{um} = \frac{y_{\bar{\sigma}}^{um} + 0,5 \cdot y_{\bar{\sigma}}^{um} \cdot \left(D_{\bar{\sigma}}^{um} - D_2 - S_{екв}^{um} \right) \cdot \left(D_{\bar{\sigma}}^{um} - D_{cn}^{um} \right)}{y_n^{um} + y_{\bar{\sigma}}^{um} + 0,5 \cdot y_{\bar{\sigma}}^{um} \cdot \left(D_{\bar{\sigma}}^{um} - D_{cn}^{um} \right)^2} =$$

$$= \frac{6,208 \cdot 10^{-11} + 0,5 \cdot 0,207 \cdot 10^{-6} \cdot (1 - 0,9 - 0,012) \cdot (1 - 0,95)}{1,676 \cdot 10^{-11} + 6,208 \cdot 10^{-11} + 0,5 \cdot 0,207 \cdot 10^{-6} \cdot (1 - 0,95)^2} = 1,533$$

Зусилля, що виникає у фланці внаслідок температурних деформацій, визначимо за формулою (40), якщо:

$$t_{\phi}^{um} = 0,96 \cdot t_{\kappa} = 0,96 \cdot 95,875 = 92,04 \text{ }^{\circ}\text{C},$$

$$t_{\bar{\sigma}}^{um} = 0,95 \cdot t_{\kappa} = 0,95 \cdot 95,875 = 91,081 \text{ }^{\circ}\text{C},$$

тоді:

$$F_t^{um} = \frac{6,208 \cdot 10^{-11} \cdot 31 \cdot 2,35 \cdot 10^{-4} \cdot 1,99 \cdot 10^5 \cdot 10^6}{1,676 \cdot 10^{-11} + 6,208 \cdot 10^{-11} + 0,5 \cdot 0,207 \cdot 10^{-6} \cdot (1 - 0,95)^2} \times$$

$$\times (15,7 \cdot 10^{-6} \cdot 92,04 - 12,2 \cdot 10^{-6} \cdot 91,081) = 0,089 \cdot 10^6 \text{ Н}.$$

Зусилля, що виникає у болтах в умовах монтажу із співвідношення (41), у якому:

$$F_{\bar{\sigma}1}^{um'} = k_{ж}^{um} \cdot F_{Д}^{um} + R_n^{um} = 1,533 \cdot 0,086 \cdot 10^6 + 0,015 \cdot 10^6 = 0,147 \cdot 10^6 \text{ Н};$$

$$F_{\bar{\sigma}1}^{um''} = 0,5 \cdot 3,14 \cdot 0,95 \cdot 0,017 \cdot 35 \cdot 10^6 = 0,887 \cdot 10^6 \text{ Н};$$

$$F_{\bar{\sigma}1}^{um'''} = 0,4 \cdot [\sigma]_{\bar{\sigma}}^{20} \cdot n_{\bar{\sigma}} \cdot f_{\bar{\sigma}} = 0,4 \cdot 140 \cdot 10^6 \cdot 31 \cdot 2,35 \cdot 10^{-4} = 0,478 \cdot 10^6 \text{ Н}.$$

Приймаємо: $F_{\bar{\sigma}1}^{um} = F_{\bar{\sigma}1}^{um''} = 0,887 \cdot 10^6 \text{ Н}.$

Зусилля на болти під час роботи апарату:

$$F_{\bar{\sigma}2}^{um} = F_{\bar{\sigma}1}^{um} + \left(1 - k_{ж}^{um} \right) \cdot F_{Д}^{um} + F_t^{um} = 0,887 \cdot 10^6 + (1 - 1,533) \cdot 0,086 \cdot 10^6 +$$

$$+ 0,089 \cdot 10^6 = 0,93 \cdot 10^6 \text{ Н}.$$

Умова міцності болтів у період монтажу за (43):

$$\frac{F_{\bar{\sigma}1}^{um}}{n_{\bar{\sigma}}^{um} \cdot f_{\bar{\sigma}}^{um}} = \frac{0,887 \cdot 10^6}{31 \cdot 2,35 \cdot 10^{-4}} = 121,757 \cdot 10^6 \text{ Па} < 210 \text{ МПа} - \text{умова}$$

виконується.

Умова міцності болтів під час роботи за (44):

$$\frac{F_{\bar{\sigma}2}^{um}}{n_{\bar{\sigma}}^{um} \cdot f_{\bar{\sigma}}^{um}} = \frac{0,93 \cdot 10^6}{31 \cdot 2,35 \cdot 10^{-4}} = 127,66 \cdot 10^6 \text{ Па} < 202 \text{ МПа} -$$

умова міцності виконується.

Умова міцності прокладки за (45), якщо:

$$F_{\bar{\sigma} \max}^{um} = \max \left\{ \begin{matrix} F_{\bar{\sigma}1}^{um} \\ F_{\bar{\sigma}2}^{um} \end{matrix} \right\} = F_{\bar{\sigma}2}^{um} = 0,93 \cdot 10^6 \text{ Н},$$

тоді:

$$\frac{F_{\bar{\sigma} \max}^{um}}{\pi \cdot D_{cn}^{um} \cdot b_{um}} = \frac{0,93 \cdot 10^6}{3,14 \cdot 0,95 \cdot 0,02} = 15,588 \cdot 10^6 \text{ Па} < 130 \text{ МПа} -$$

умова міцності виконується.

Умова міцності втулки фланця, обмеженої розміром S_0^{um} , за співвідношенням (46), якщо $f_{\phi}^{um} = 1$, при: $\chi_{um} = \frac{h_g^{um}}{\sqrt{D_2 \cdot S_0^{um}}} = \frac{0,049}{\sqrt{0,9 \cdot 0,012}} = 0,472$,

тоді:

$$\begin{aligned} T_n^{um} &= \frac{\left(D_n^{um} \right)^2 \cdot \left(1 + 8,55 \cdot \lg \frac{D_n^{um}}{D_2} \right) - D_2^2}{\left(1,05 \cdot D^2 + 1,945 \cdot \left(D_n^{um} \right)^2 \right) \cdot \left(\frac{D_n^{um}}{D_2} - 1 \right)} = \\ &= \frac{1^2 \cdot \left(1 + 8,55 \cdot \lg \frac{1}{0,9} \right) - 0,9^2}{\left(1,05 \cdot 0,9^2 + 1,945 \cdot 1^2 \right) \cdot \left(\frac{1}{0,9} - 1 \right)} = 1,871, \end{aligned}$$

значення крутного моменту M_0^{um} знайдемо за співвідношенням (49), якщо:

$$M_0^{um'} = 0,5 \cdot \left(D_{\bar{\sigma}}^{um} - D_{cn}^{um} \right) \cdot F_{\bar{\sigma}1}^{um} = 0,5 \cdot (1 - 0,95) \cdot 0,887 \cdot 10^6 = 0,022 \cdot 10^6 \text{ Н м},$$

$$\begin{aligned} M_0^{um''} &= 0,5 \cdot \left[\left(D_{\bar{\sigma}}^{um} - D_{cn}^{um} \right) \cdot F_{\bar{\sigma}2}^{um} + \left(D_{cn}^{um} - D_1 - S_{екв}^{um} \right) \cdot F_{D}^{um} \right] \cdot \frac{[\sigma]_{\bar{\sigma}}^{20}}{[\sigma]_{\bar{\sigma}}^{um}} = \\ &= 0,5 \cdot \left[(1 - 0,95) \cdot 0,93 \cdot 10^6 + (0,95 - 0,9 - 0,012) \cdot 0,086 \cdot 10^6 \right] \cdot \frac{140 \cdot 10^6}{135 \cdot 10^6} = \\ &= 0,026 \cdot 10^6 \text{ Н м}. \end{aligned}$$

Приймаємо: $M_0^{um} = M_0^{um''} = 0,026 \cdot 10^6 \text{ Н м}$, $D_2^* = D_2 = 0,9 \text{ м}$, тому що:

$$20 \cdot S_1^{um} = 20 \cdot 0,012 = 0,24 \text{ м} < 1,2 \text{ м}.$$

З урахуванням параметрів, визначених вище, знайдемо значення напруження в оболонці, викликане крутним моментом за формулою (48):

$$\sigma_1^{um} = \frac{1,871 \cdot 0,026 \cdot 10^6 \cdot 0,613}{0,9 \cdot (0,012 - 0,0015)^2} = 154,922 \cdot 10^6 \text{ Па}.$$

Підставимо отримане значення в (47) і отримаємо:

$$\sigma_0^{um} = 1 \cdot 154,922 = 154,922 \text{ МПа}.$$

$$\sigma_t^{um} = \frac{p_{um} \cdot D_2}{2 \cdot (S_0^{um} - c')} = \frac{0,122 \cdot 10^6 \cdot 0,9}{2 \cdot (0,012 - 0,0015)} = 5,229 \cdot 10^6 \text{ Па}.$$

$$\sigma_m^{um} = \frac{p_{um} \cdot D_2}{4 \cdot (S_0^{um} - c')} = \frac{0,122 \cdot 10^6 \cdot 0,9}{4 \cdot (0,012 - 0,0015)} = 2,614 \cdot 10^6 \text{ Па}.$$

Розрахуємо напруження у втулці та перевіримо виконання умови міцності:

$$\begin{aligned} & \sqrt{(\sigma_0^{um} + \sigma_m^{um})^2 + (\sigma_t^{um})^2 - (\sigma_0^{um} + \sigma_m^{um}) \cdot \sigma_t^{um}} = \\ & = \sqrt{(154,992 + 2,614)^2 + 5,229^2 - (154,992 + 2,614) \cdot 5,229} = 154,988 \text{ МПа} < \\ & < 570 \text{ МПа} - \text{умова міцності виконується.} \end{aligned}$$

Умова герметичності фланцевого з'єднання за формулою (50), якщо:

$$\begin{aligned} \sigma_{\kappa}^{um} &= \frac{M_0^{um} \cdot \left[1 - \nu_{um} \cdot \left(1 + \frac{\lambda_{um}'}{0,9} \right) \right]}{D_2 \cdot (h_{\phi}^{um})^2} \cdot \frac{\psi_{um}^2}{2} = \\ &= 0,026 \cdot 10^6 \cdot \left[1 - 0,613 \cdot (1 + 0,9 \cdot 0,38) \right] \cdot \frac{13,857}{0,9 \cdot 0,039^2} = 46,678 \cdot 10^6 \text{ Па}, \end{aligned}$$

тоді умова герметичності матиме вигляд:

$$\theta_{um} = \frac{46,678 \cdot 10^6}{2 \cdot 10^5 \cdot 10^6} \cdot \frac{0,9}{0,039} = 0,0054 \text{ рад} < 0,013 \text{ рад} - \text{умова}$$

виконується.

4.3.8 Перевірка несучої спроможності обичайки випарного апарату під дією опорних навантажень

Вихідні дані:

- абсолютний тиск гріючої пари $p_{gn} = 0,4 \text{ МПа}$;
- абсолютний тиск навколишнього середовища $p_{atm} = 0,1 \text{ МПа}$;
- діаметр гріючої камери в районі подачі гріючої пари $D' = 2,14 \text{ м}$;
- діаметр сепаратора $D_1 = 3,2 \text{ м}$;
- товщина стінки гріючої камери $S_{гк} = 4 \text{ мм}$;
- товщина стінки сепаратора $S_c = 12 \text{ мм}$;
- відстань від опори до найближчого зварного шва (для гріючої камери) $f_{гк} = 0,02 \text{ м}$;
- відстань від опори до найближчого зварного шва (для сепаратора) $f_c = 0,53 \text{ мм}$;
- кількість опор гріючої камери $n'_{гк} = 3$;
- кількість опор сепаратора $n'_c = 3$;
- допустиме напруження матеріалу фланця $[\sigma]_{опр} = 467 \text{ МПа}$;
- вага випарного апарату $G_{в.а} = 250000 \text{ Н}$;
- коефіцієнт для визначення граничного напруження в опорі $K_2 = 1,2$;
- коефіцієнт запасу міцності за границею текучості $n_m = 1,5$.

4.3.8.1 Перевірка несучої спроможності обичайки гріючої камери під дією опорних навантажень

Умова застосування формул [21]:

$$\frac{S_{гк} - c'}{D'} = \frac{0,004 - 0,0015}{2,14} = 1,168 \cdot 10^{-3} < 0,05 \quad - \quad \text{умова}$$

виконується.

Навантаження на одну опору:

$$F_{оп}^{зк} = \frac{G_{в.а}}{n'_{зк}} = \frac{250000}{3} = 83,3 \cdot 10^3 \text{ Н.}$$

За знайденим навантаженням обираємо стандартні опори типу I, з наступними розмірами: $c = 65 \text{ мм}$, $c_1 = 160 \text{ мм}$, $d_{\phi} = 36 \text{ мм}$, $g' = 256 \text{ мм}$, $b_4 = 310 \text{ мм}$, $h_1 = 360 \text{ мм}$, $h_2 = 24 \text{ мм}$, $K = 35$, $K_1 = 80$, $l_1 = 230 \text{ мм}$, $S_1^{оп} = 12 \text{ мм}$. Опора приварюється до апарату разом із підкладним листом, розміри якого: $b_2 = 400 \text{ мм}$, $b_3 = 820 \text{ мм}$, $S_2^{оп} = 20 \text{ мм}$ [21].

Відстань між точкою прикладання зусиль та підкладним листом:

$$e_1 = \frac{5 \cdot l_1}{6} = \frac{5 \cdot 0,23}{6} = 0,192 \text{ м.}$$

Загальне мембранне напруження [22]:

$$\sigma_{тy}^{зк} = \frac{p_{зк} \cdot D'}{2 \cdot (S_{зк} - c')} = \frac{0,4 \cdot 10^6 \cdot 2,14}{2 \cdot (0,004 - 0,0015)} = 171,2 \cdot 10^6 \text{ Па.}$$

Коефіцієнт міцності зварного шва вибираємо в залежності від співвідношення:

$$\sqrt{D' \cdot S_{зк}} = \sqrt{2,14 \cdot 0,004} = 0,093 \text{ м} > f_{зк} = 0,02 \text{ мм},$$

тоді приймаємо: $\phi_{зк} = 1$.

Умови застосування розрахункових формул при наявності підкладного листа [21]:

$$\frac{S_{зк} - c'}{D'} = \frac{0,004 - 0,0015}{2,14} = 1,168 \cdot 10^{-3} < 0,05 \quad - \quad \text{умова}$$

виконується;

$$0,2 \cdot h_1 = 0,2 \cdot 360 = 72 \text{ мм} < g' = 256 \text{ мм} \quad - \quad \text{умова}$$

виконується;

$$S_2^{оп} = 20 \text{ мм} > S_{зк} = 4 \text{ мм} \quad - \quad \text{умова виконується.}$$

Загальні мембранні напруження опор в обичайці [21]:

$$\sigma_m^{зк} = \sigma_{тy}^{зк} = 171,2 \cdot 10^6 \text{ Па.}$$

Коефіцієнт, що враховує ступінь навантаження загальними напруженнями:

$$v_2^{зк} = \frac{K_2}{n_m} \cdot \frac{\sigma_{зк}}{[\sigma]} = \frac{1,2}{1,5} \cdot \frac{171,2 \cdot 10^6}{467 \cdot 10^6} = 0,293.$$

Коефіцієнт, що відображає відношення місцевих мембранних напружень до місцевих напружень вигину. Обирається в залежності від попереднього коефіцієнту і становить: $v_1^{зк} = 0,4$.

Коефіцієнт для визначення граничного напруження [21]:

$$K_1^{зк} = \frac{1 + 3 \cdot v_1^{зк} \cdot v_2^{зк}}{3 \cdot (v_1^{зк})^2} \cdot \left(\pm \sqrt{\frac{9 \cdot (v_1^{зк})^2 \cdot [1 - (v_2^{зк})^2]}{(1 + 3 \cdot v_1^{зк} \cdot v_2^{зк})^2} + 1} - 1 \right) =$$

$$= \frac{1 + 3 \cdot 0,4 \cdot 0,293}{3 \cdot 0,4^2} \cdot \left(\pm \sqrt{\frac{9 \cdot 0,4^2 \cdot (1 - 0,293^2)}{(1 + 3 \cdot 0,4 \cdot 0,293)^2} + 1} - 1 \right) = 0,879.$$

Граничне напруження обичайки в місці приварки опорної лапи.

$$[\sigma]_{опр}^{зк} = K_1^{зк} \cdot [\sigma]_{опр} \cdot \frac{n_m}{K_2} = 0,879 \cdot 467 \cdot 10^6 \cdot \frac{1,5}{1,2} = 513,116 \cdot 10^6 \text{ Па.}$$

Геометричні параметри конструктивних вузлів приєднання опорних лап до обичайки з підкладним листом [21]:

$$u = \ln \frac{D'}{2 \cdot (S_{зк} - c')} = \ln \frac{2,14}{2 \cdot (0,004 - 0,0015)} = 6,059;$$

$$y = \ln \frac{h_1}{D'} = \ln \frac{0,36}{2,14} = -1,782;$$

$$y_1 = \ln \frac{b_4}{D'} = \ln \frac{0,31}{2,14} = -1,932;$$

$$y_2 = \ln \frac{b_3}{D'} = \ln \frac{0,82}{2,14} = -0,959.$$

Значення коефіцієнта K_8 знаходимо графічним способом, попередньо розрахувавши наступні співвідношення:

$$\frac{b_3}{D'} = \frac{0,82}{2,14} = 0,383;$$

$$2 \cdot \left(\frac{D'}{S_{\text{ск}}} - c' \right) = 2 \cdot \left(\frac{2,14}{0,004 - 0,0015} \right) = 428,$$

тоді: $K_8 = 0,18$.

Допустиме зусилля у вузлі приварки опорної лапи до обичайки з підкладним листом [21]:

$$[F]_{\text{опр}}^{\text{ск}} = \frac{[\sigma]_{\text{опр}}^{\text{ск}} \cdot b_3 \cdot (S_{\text{ск}} - c')^2}{K_8 \cdot (e_1 - S_2)} =$$

$$= \frac{513,116 \cdot 10^6 \cdot 0,82 \cdot (0,004 - 0,0015)^2}{0,18 \cdot (0,192 - 0,02)} \quad \underline{\underline{3}}$$

Умову несучої спроможності опорного вузла підкладного листа за співвідношенням (51):

$$83,3 \text{ кН} < 84,839 \text{ кН} - \text{умова виконується.}$$

4.3.8.2 Перевірка несучої спроможності обичайки сепаратора під дією опорних навантажень

Розрахункова схема наведена на рисунку 11.

Умова застосування формул:

$$\frac{S - c'}{D_1} = \frac{0,012 - 0,0015}{3,2} = 3,281 \cdot 10^{-3} < 0,05 \quad - \quad \text{умова}$$

виконується.

Навантаження на одну опору визначаємо за формулою:

$$F_{\text{опр}}^c = \frac{G_{\text{в.а}}}{n_c'} = \frac{250000}{3} = 83,3 \cdot 10^3 \text{ Н.}$$

За знайденим навантаженням обираємо стандартні опори типу I, з наступними розмірами: $c = 65 \text{ мм}$, $c_1 = 160 \text{ мм}$, $d_6 = 36 \text{ мм}$, $g' = 256 \text{ мм}$, $b_4 = 310 \text{ мм}$, $h_1 = 360 \text{ мм}$, $h_2 = 24 \text{ мм}$, $K = 35$, $K_1 = 80$, $l_1 = 230 \text{ мм}$, $S_1^{\text{опр}} = 12 \text{ мм}$. Опора приварюється до апарату без підкладного листа [21].

Відстань між точкою прикладання зусиль та обичайкою апарату:

$$e_1 = \frac{5 \cdot l_1}{6} = \frac{5 \cdot 0,23}{6} = 0,192 \text{ м.}$$

Загальне мембранне напруження:

$$\sigma_{my}^c = \frac{P}{2 \cdot \left(\frac{D}{S_c} - c_1 \right)} = \frac{0,1 \cdot 10^6 \cdot 3,2}{2 \cdot (0,012 - 0,0015)} = 15,238 \cdot 10^6 \text{ Па.}$$

Коефіцієнт міцності зварного шва вибираємо в залежності від співвідношення:

$$\sqrt{D_1 \cdot S_c} = \sqrt{3,2 \cdot 0,012} = 0,196 \text{ м} < f_c = 0,53 \text{ мм,}$$

тоді приймаємо: $\varphi_c = 95$.

Загальні мембранні напруження опор в обичайці [21]:

$$\sigma_m^c = \sigma_{my}^c = 15,238 \cdot 10^6 \text{ Па.}$$

Коефіцієнт, що враховує ступінь навантаження загальними напруженнями:

$$v_2^c = \frac{K_2}{n_m} \cdot \frac{\sigma_m^c}{[\sigma] \cdot \varphi_c} = \frac{1,2}{1,5} \cdot \frac{15,238 \cdot 10^6}{467 \cdot 10^6 \cdot 0,95} = 0,027.$$

Коефіцієнт, що відображає відношення місцевих мембранних напружень до місцевих напружень вигину. Вибирається в залежності від попереднього коефіцієнту і становить: $v_1^c = 0,3$.

Коефіцієнт для визначення граничного напруження [21]:

$$K_1^c = \frac{1 + 3 \cdot v_1^c \cdot v_2^c}{3 \cdot (v_1^c)^2} \cdot \left(\pm \sqrt{\frac{9 \cdot (v_1^c)^2 \cdot [1 - (v_2^c)^2]}{(1 + 3 \cdot v_1^c \cdot v_2^c)^2} + 1} - 1 \right) =$$

$$= \frac{1 + 3 \cdot 0,3 \cdot 0,027}{3 \cdot 0,3^2} \cdot \left(\pm \sqrt{\frac{9 \cdot 0,3^2 \cdot (1 - 0,027^2)}{(1 + 3 \cdot 0,3 \cdot 0,027)^2} + 1} - 1 \right) = 1,256.$$

Граничне напруження обичайки в місці приварки опорної лапи.

$$[\sigma]_{opr}^c = K_1^c \cdot [\sigma]_1 \cdot \frac{n_m}{K_2} = 1,256 \cdot 467 \cdot 10^6 \cdot \frac{1,5}{1,2} = 733,19 \cdot 10^6 \text{ Па.}$$

Геометричні параметри конструктивних вузлів приєднання опорних лап до обичайки без підкладного листа:

$$u = \ln \frac{D_1}{2 \cdot (S_c - c')} = \ln \frac{3,2}{2 \cdot (0,012 - 0,0015)} = 5,026;$$

$$y = \ln \frac{h_1}{D_1} = \ln \frac{0,36}{3,2} = -2,185;$$

$$y_1 = \ln \frac{b_4}{D_1} = \ln \frac{0,31}{3,2} = -2,334.$$

Значення коефіцієнта K_7 знаходимо за графіком [21], попередньо визначивши:

$$\frac{h_1}{D_1} = \frac{0,36}{3,2} = 0,113;$$

$$2 \cdot \left(\frac{D_1}{S_c - c'} \right) = \frac{3,2}{2 \cdot (0,012 - 0,0015)} = 152,$$

тоді $K_7 = 0,83$.

Допустиме зусилля у вузлі приварки опорної лапи до обичайки без підкладного листа [21]:

$$\begin{aligned} [F]_{оп}^c &= \frac{[\sigma]_{оп}^c \cdot h_1 \cdot (S_c - c')^2}{K_7 \cdot e_1} = \\ &= \frac{733,19 \cdot 10^6 \cdot 0,36 \cdot (0,012 - 0,0015)^2}{0,83 \cdot 0,192} = 182,607 \cdot 10^3 \text{ Н.} \end{aligned}$$

Умову несучої спроможності опорного вузла перевіримо за формулою (51):

$$83,3 \text{ кН} < 182,6077 \text{ кН} - \text{умова виконується.}$$

4.5 Рекомендації з ремонту, монтажу та експлуатації апаратів в установці

Монтаж випарного апарату починається із установки корпусу гріючої камери на три опори типу «лапа». До корпусу гріючої камери, за допомогою фланцевого з'єднання, приєднується днище гріючої камери, а також

приварюється штуцер для вводу гріючої пари (разом із укріплюючим кільцем). До верхньої частини гріючої камери приєднується царга і еліптична кришка.

Монтаж сепаратора розпочинаємо із з'єднання верхньої і нижньої царг, її встановлення на трьох опорах типу «лапа» і з'єднання з гріючою камерою. Потім приєднується кришку апарату і (за допомогою двох фіксуючих кілець) фіксується зливна труба бризкоуловлювача. Далі приєднується днище, яке встановлюється на циліндричну опору.

Завершальним етапом монтажу апарату є з'єднання гріючої камери і сепаратора за допомогою циркуляційної труби і перевірка апарату на герметичність.

Усі складальні одиниці випарного апарату з'єднуються між собою за допомогою фланцевих з'єднань типу «шип-паз».

У апараті, перед відкриттям, доводять тиск до атмосферного, з апарату видаляють робоче середовище, після чого його пропарюють водяною парою. Після пропарювання апарат промивають водою. В деяких випадках пропарювання і промивання чергують кілька разів [15].

Пропарений і промитий апарат від'єднують від усіх комунікацій глухими заглушками, що встановлюються у фланцевих з'єднаннях штуцерів. Установку кожної заглушки і наступне її зняття реєструють в спеціальному журналі.

Корпус апарату як зовні, так і з середини підлягає візуальному огляду. Виявлення дефектів корпусу, що вимагає високої кваліфікації, включає візуальний огляд для визначення загального стану корпусу і ділянок, схильних до найбільшого зносу; вимірювання залишкової товщини корпусу за допомогою ультразвукових дефектоскопів; перевірку на щільність зварних швів і роз'ємних з'єднань і т. д [15].

Нещільні зварні шви вирубують, зачищають і заварюють. Зношені штуцери і люки вирізають і замінюють новими з обов'язковою установкою зміцнюючих кілець. Бажано, щоб зміцнюючі кільця нових штуцерів мали дещо більший діаметр, ніж старі: це дозволяє приварювати їх в новому місці. Ремонту піддають усі штуцери.

Під час кожного ремонту вимірюють фактичну товщину стінки корпусу випарного апарату [15].

Гріюча камера має жорстку конструкцію, тобто нерухома трубна решітка жорстко з'єднана з корпусом. Основний їх недолік – неможливість механічного очищення внутрішньої поверхні корпусу і зовнішньої поверхні труб від бруду і відкладень.

Візуальному огляду підлягають тільки кришки, кінці і внутрішні канали труб, штуцери на корпусі і кришках. Дефекти інших частин гріючої камери можуть бути виявлені тільки при опресуванні.

Терміни і зміст ревізій і ремонтів визначають, виходячи з конкретних експлуатаційних умов. Необхідність в достроковому ремонті може бути обумовлена різким погіршенням теплообміну (відповідно до технологічної карти). У такому разі можливе забруднення внутрішніх або зовнішніх поверхонь (чи обох одночасно) труб. Зношування трубних решіток практично виключається через їх велику товщину [15].

При проведенні ремонту з трубного і міжтрубного просторів через штуцери видаляють їх вміст. Далі протягом часу, визначеного фізико-хімічними властивостями робочого середовища, їх промивають водою, потім пропарюють. Завдяки промиванню і пропарюванню відбувається підготовка апарату до відкриття, видалення вибухо- і пожежонебезпечних або токсичних речовин, розбору і очищення поверхонь від відкладень. Слід зазначити, що промивання – єдино можливий спосіб видалення відкладень із зовнішніх поверхонь труб і внутрішніх поверхонь корпусу. Тому промиванню міжтрубного простору гріючої камери необхідно приділяти особливу увагу. Бажано промивати апарати гарячою водою, що підігрівається парою. Аналогічно промивають трубний простір [15].

Після промивання апарат від'єднують від комунікації глухими заглушками і приступають до його розбирання.

Фактичну товщину стінки і днищ вимірюють шляхом висвердлювання отворів, а також за допомогою приладів для ультразвукового вимірювання товщини стінки.

Особливої ретельності вимагає перевірка стану кінців труб в трубних решітках. Перевірку проводять за допомогою візуального огляду, вимірюванням діаметру та товщини стінки частин апарату, а також опресуванням. Складно визначити стан розвальцьованого з'єднання; його оцінюють за результатами вимірювання внутрішнього діаметру розвальцьованого кінця труби.

Дефекти, які не можна виявити під час візуального огляду і вимірювань, виявляють опресовуванням міжтрубного і трубного просторів [15].

Трубу, що на практиці вийшла з ладу, заглушають з двох кінців металевими конусними пробками. Число таких труб не повинне перевищувати 10% від загального числа труб в пучку, інакше значно зросте гідравлічний опір і помітно зменшиться поверхня теплообміну.

Необхідність ремонту корпусу встановлюють за результатами вимірювання товщини і перевірки зварних швів.

Перед повною зборкою апарату слід проводити опресовування міжтрубного простору. При цьому виявиться нещільність в корпусі, в місцях з'єднання труб з трубними ґратами, а також зношені теплообмінні труби (при появі в них води). Апарат остаточно опресовують після закриття кришок. З апарату, що витримав випробування, зливають воду, а потім знімають заглушки [15].

4.6 Висновки

1. Дану конструкцію рекомендовано використовувати на цьому виробництві тому, що: конструкцію можна швидко розібрати та зібрати; осад можна видаляти механічним способом; має місце легкий доступ до внутрішньої поверхні гріючих труб: забезпечується висока швидкість процесу випарювання.

2. Проведені розрахунки теплового та матеріального балансу, конструктивний розрахунок апарата, визначено основні габаритні розміри та максимальні напруження в апараті.

3. Розраховані геометричні розміри складальних одиниць апарату.

4. Визначено матеріали, з яких виготовляється апарат.

5. Надані рекомендації з монтажу та експлуатації

6. Отримані результати задовольняють необхідні робочі умови.

5. РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЕКТУ

5.1 Резюме

Бізнес ідея: ідея розвитку

Мета наукової розробки: збільшення прибутку виробництва за рахунок значного збільшення продуктивності та інтенсивності процесу випарювання при збереженні якості продукту і незначному збільшенні енерговитрат.

Таблиця 5.1 Техніко-економічні показники (для заданих параметрів):

Апарат, призначений для упарювання розчину ітаконової кислоти	
Концентрація розчину, % (мас):	
початкова	15
кінцева	65
Продуктивність, кг/с:	
по вихідному продукту	2,89
по кінцевому продукту	0,667
по випареній волозі	2,223
Площа поверхні теплообміну, м²	250
Середовище у апараті:	
у сепараторі	розчин ітаконової кислоти, водяна пара
у міжтрубному просторі	насичена водяна пара
у трубному просторі	розчин ітаконової кислоти
Тиск, МПа:	
у сепараторі	0,08
у міжтрубному просторі	0,4

у трубному просторі	0,1
Температура, С°:	
у сепараторі	94
у міжтрубному просторі	144
у трубному просторі	102
Габаритні розміри, мм:	
довжина	7490
ширина	3520
висота	13500
Маса, кг:	15000

Тема: Модернізація вакуум – випарного апарату, для виробництва ітаконової кислоти.

Назва: Випарний апарат з виносною гріючою камерою з природною циркуляцією.

Суб'єкт замовлення: юридична, фізична особа або фізична особа підприємець.

Об'єкт дослідження: Лінія виробництва ітаконової кислоти з розробкою випарного апарату з виносною гріючою камерою з природною циркуляцією. Випуск ітаконової кислоти.

Місце розробки в інноваційному ланцюжку цінності: розробка.

Плановий обсяг впровадження технологічної лінії: для впровадження достатньо замінити апарат старої конструкції на запропоновану нову конструкцію випарного апарату з виносною гріючою камерою. Час заміни апарату з урахуванням зварювання деталей та монтажу 4-5 діб. Можлива заміна апаратів на лінії у період планових ремонтів.

Продукт: готова очищена ітаконова кислота. Завдяки новій конструкції, отримуємо більшу швидкість потоку речовини, не впливаючи на якість етапів очистки та концентрування випарного апарату. Таким чином збільшилась продуктивність на 25%, а енергетичні витрати збільшились всього на 5% (За один цикл отримуємо 1800кг ітаконової кислоти, з удосконаленою конструкцією за один цикл маємо 2250кг. За 1 день 8 циклів.

Технологія: конструкція випарного апарату для концентрування та випарювання ітаконової кислоти.

Достатність сировинної бази:

для виготовлення корпусу та деталей, що контактують з розчином, який упарюється використовується сталь 1X21H5T (діапазон цін 25-47 грн/кг: середня ціна за 1 кілограм 36 грн), опори виготовляються зі сталі 45X (діапазон цін 13-46 грн/кг: середня ціна за 1 кілограм 27 грн). Вона є широко поширеною і застосовуваною маркою сталі в Україні. Сталь 1X21H5T та 45X виготовляється в достатній кількості і постійно присутня на ринку. Також має ряд аналогів як в Україні та і в країнах Європи.

Кваліфікація персоналу: всі категорії персоналу (спеціалісти, службовці, робітники).

Ринок збуту:

Провідні світові та українські розробники та виробники випарних апаратів для харчової промисловості

Таблиця 5.2 Провідні світові компанії виробники випарних установок

Назва компанії	Країна
UNIPEKTIN	Болгарія
Wiegand	Німеччина
Theseus Lab	Франція
Proget EnTwTo Ltd.	Австрія

BOSCH	Німеччина
Siemens AG	Німеччина
TPS	Україна
ТЕХНОЛОГ	Україна
Тепломаш	Росія
Alfa Laval	Росія
Dremel	США
DeWALT	США
Vestel	Турція
Black & Decker	США
Miele	Німеччина

Конкурентні переваги: задана конструкція дозволяє задати виробництву збільшені об'єми випуску готової продукції, гарантує високу якість продукту в порівнянні з іншими її аналогами.

5.2 Фінансові складові проєкту

У таблиці 13 наведені основні економічні показники .

Таблиця 13 – Економічні складові

№ п/п	Складова	Сума, грн
1	Сировина та матеріали	104 000
2	Вартість приміщення (грн/міс)	10 000
3	Нематеріальні активи	15 000
4	Інше	30 000
5	Амортизація	20 000
6.	Заробітня плата персоналу (грн/міс)	40 000
7.	Разом собівартість	211 000

Випарний апарат має такі складові як: 20 000грн – гріюча камера; 10 000 грн – сепаратор; 5 000 грн – циркуляційна труба.

Собівартість розробки 1 апарату [38]:

$$C = \text{Обз} + A = 211\,000 \text{ грн};$$

$$C_{\text{од}} = C/V = 211\,000/1 = 211\,000 \text{ грн}.$$

Запланована ринкова ціна (за конкурентним методом) апарату:

$$\Pi = 350\,000 \text{ грн/од.}$$

Прибуток:

$$\Pi = \Pi - C = 350\,000 - 211\,000 = 139\,000 \text{ грн}.$$

Рентабельність:

$$P = (\Pi/C) * 100\% = (139\,000/211\,000) * 100\% = 65.9 \, \%.$$

1) Витратний метод

У витратному методі відсоток прибутку мінімальний та складає до 3%, бо обмежується інфляцією. Тому цей метод покриває тільки витрати.

$$\Pi = C + \% \Pi = 211\,000 + 3\,475 = 214\,475 \text{ грн}.$$

2) Параметричний метод

Параметричний метод включає певні параметри готового товару вже готового аналогічного апарату з врахуванням оцінки нової та базової моделі.

$\text{Ц}_{\text{нovoї моделі}} = \text{Ц}_{\text{базової моделі}} * (\text{балова оцінка нової моделі} / \text{балова оцінка базової моделі}) = 320\,000 * (10/8) = 400\,000 \text{ грн.}$

3) Метод точки беззбитковості

Метод точки беззбитковості базується на розрахунках сукупних витрат підприємства і його сукупного доходу, який одержаний в результаті реалізації різних обсягів виготовленої продукції. Даний метод потребує розгляду різних варіантів ціни, і визначення їх впливу на обсяги збуту, необхідного для подолання рівня беззбитковості.

$\text{Ц} = (\text{А} + \text{Обз} * \text{В}) / \text{В} = (20\,000 + 191\,000 * 1) / 1 = 211\,000 \text{ грн.}$

4) Метод конкурентних цін

Метод конкурентних цін використовують підприємства, які виходять виключно з умов конкуренції і встановлюють ціну вищу чи нижчу ніж конкуренти.

Якщо оцінити ринкові ціни на обладнання для випарювання, то можна встановити ціну в розмірі 350 000 грн за один апарат, а прибуток 150 000, отже маємо максимально допустиму собівартість:

$350\,000 - 150\,000 = 200\,000 \text{ грн.}$

5) Агрегатний метод.

Агрегатний метод прийнято застосовувати до товарів, які складаються з певної окремих виробів або для товарів, які складаються з окремих вузлів, деталей:

$$Ц = Ц_1 + Ц_2 + Ц_3 + Ц_4 + Ц_c + H = 20\,000 + 10\,000 + 5\,000 + 12\,000 + 7\,000 + 55\,000 = 109\,000 \text{ грн}$$

$Ц_1 = 20\,000$ грн – грююча камера;

$Ц_2 = 10\,000$ грн – сепаратор;

$Ц_3 = 5\,000$ грн – циркуляційна труба;

$Ц_4 = 12\,000$ грн – технічна документація;

$Ц_c = 7\,000$ грн – ціна за монтаж;

$Ц_H = 55\,000$ грн – нормативний прибуток.

Таблиця 13 – Результати методів ціноутворення

Метод ціноутворення	Прогнозна ціна	Планований прибуток	Максимально допустима собівартість
Витратний	214 475	3 475	211 000
Параметричний	400 000	189 000	211 000
Конкурентний	350 000	150 000	200 000
На підставі точки безбитковості	211 000	0	211 000
Агрегатний	109 000	62 000	47 000
Оптимальні величини	400 000	189 000	211 000

Витратний метод має мінімальний відсоток прибутку, у випадку методу точки безбитковості також спостерігається невеликий прибуток, проте ціна визначається точно.

Так як параметричний метод дозволяє отримати оптимальну ціну для ринку та оптимальні показники прибутку, то при визначенні ціни на випарний апарат я буду враховувати його.

Варіаціями прогнозу щодо джерел фінансування є самофінансування, яке здійснюється лише за рахунок власних внутрішніх коштів підприємства або кредит.

5.3 Шляхи монетизації проєкту

Основні методи просування проєкту на ринок продемонстровані у таблиці 14.

Таблиця 14 – Методи просування стартап-проєкту на ринок

Метод просування	Об'єкт просування	Мета просування	Засіб просування	Переваги	Недоліки
Пропаганда	Ідея модернізованого випарного апарату	Переконати потенційних споживачів в тому, що апарат забезпечить необхідну ефективність на виробництві та гарну якість вихідної продукції	Активна участь у виставках спеціалізованого обладнання; проведення відкритих презентацій; розміщення інформації про ідею у спеціалізованих каталогах. Всі засоби просування супроводжуються консультаціями споживачів	Розширення аудиторії потенційних споживачів; Ознайомлення з самою ідеєю та можливість отримати всі можливі відповіді дає змогу налаштувати міцний контакт зі споживачем	Вартість загальних затрат на цей метод поширення; не має гарантії позитивного результату
Реклама	Випарний апарат	Створення зацікавленості потенційних споживачів до випарного апарату	Публікації апарату в спеціалізованих каталогах, брошурах. Створення відео, на якому робиться акцент на принципі роботи, процесі.	Формування довіри у споживачів за рахунок детальної інформації про апарат	Вартість загальних затрат на цей метод поширення;

Продовження таблиці 14

Стимулювання збуту	Випарний апарат	Перехоплення споживачів у конкурентів	Залучення клієнтів певними дарунками : безкоштовна діагностика апарату, безкоштовна доставка та перше діагностування, безкоштовний ремонт обладнання протягом 2-х років)	У споживача буде зростати довіра та зацікавленість за рахунок надання безкоштовних послуг;	Додаткові витрати на дарунки, відповідно, зростає собівартість обладнання
Особистий продаж	Випарний апарат	Отримання зі споживачів потенційних інвесторів	Аналіз потреб та особистих побажань клієнта, за рахунок безпосереднього контакту;	Налагодження контакту зі споживачем, встановлення добрих відносин	Повільне зростання аудиторії, через те, що на аналіз та встановлення контакту відводиться багато часу; необхідність у компетентних продавцях
Інтернет-маркетинг	Ідея модернізованого випарного апарату; випарний апарат	Створення зацікавленості потенційних споживачів до випарного апарату та ідеї модернізації; поширення переваг апарату	Соціальні мережі, пошукові системи, персоналізований сайт	Економія затрат на розповсюдження інформації; можливість швидко реагувати на побажання споживачів, аналіз широкої аудиторій	Вірогідність «набриднути» споживачам; не всі клієнти довіряють інформації з інтернету

Ефективним методом просування мого стартап-проєкту є інтернет-маркетинг. Це пов'язано з вузькоспеціалізованим обладнанням, адже у цьому методі затрати на розповсюдження економляться, проте разом з тим є можливість охопити більшу аудиторію. Розміщуючи інформацію на сайтах для потенційних споживачів, є велика вірогідність за короткий час налагодити контакт, здійснити продаж обладнання або ідеї.

5.4 Висновки

Запропонований стартап-проект буде напрямлений на модифікацію та продаж існуючого обладнання. Аналіз впливу факторів зовнішнього середовища показав, що найменшу ймовірність настання загрози, що впливає на цінність стартапу мають географічний та культурні фактори, а найвищу - політичні та економічні.

Сформований список споживачів дає змогу зрозуміти можливу успішність та цінність проєкту. Квадрат Бове демонструє, що даний проєкт знаходиться у зоні «Партизани», що дозволяє більш докладніше підготувати необхідні критерії вдосконалення ідеї для переходу до іншої зони. Ключовими факторами успіху за якими перемагає мій проєкт «Відповідність ДСТУ при виготовленні апарату», «Гарантійний термін для обладнання», отже саме з ними я буду заходити на ринок.

Параметричний метод дозволяє отримати оптимальну ціну для ринку та оптимальні показники прибутку, то при визначенні ціни на випарний апарат я буду враховувати його. Варіаціями прогнозу щодо джерел фінансування є самофінансування, яке здійснюється лише за рахунок власних внутрішніх коштів підприємства.

ВИСНОВКИ

Проведений літературний огляд підтвердив актуальність виробництва ітаконової кислоти, яка використовується в різноманітних галузях промисловостей, зокрема, фармацевтичній та хімічній. Патентне дослідження показує, що на протязі останніх років застосовуються різноманітні типи апаратів для різних видів промислових виробництв.

Результати комп'ютерного моделювання підтверджують доцільність застосування оребреної труби в гріючій камері випарного апарату. Було отримано значення температури на внутрішній поверхні оребреної труби, яке на 11 °C перевищує показник гладкої труби. Також зафіксовано більшу рівномірність нагріву всієї площі поверхні труби з ребрами.

Були проведені розрахунки, що підтвердили працездатність та надійність обраної конструкції при виробництві ітаконової кислоти. Підібраний матеріал повністю підходить до умов обраного середовища. Описані рекомендації з проведення монтажу та експлуатації забезпечують довгострокову та коректну роботу випарного апарату.

Обрана установка є найбільш оптимальним варіантом для виробництва ітаконової кислоти. Це пов'язано з наявністю простого доступу до поверхонь труб у гріючій камері та швидкого збирання та розбирання конструкції.

Запропонований стартап-проект буде напрямлений на модифікацію та продаж існуючого обладнання. За рахунок зміни матеріалу складових елементів установки розрахунками підтверджено зменшення собівартості ітаконової кислоти.

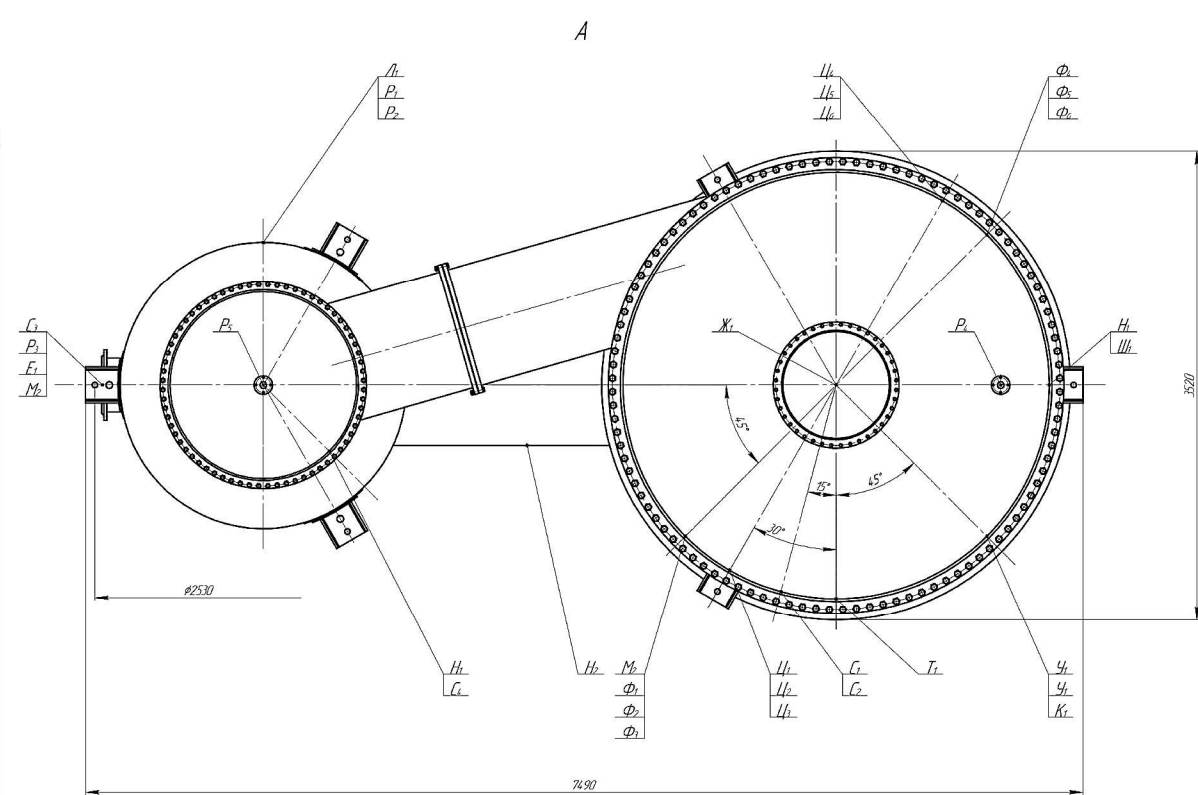
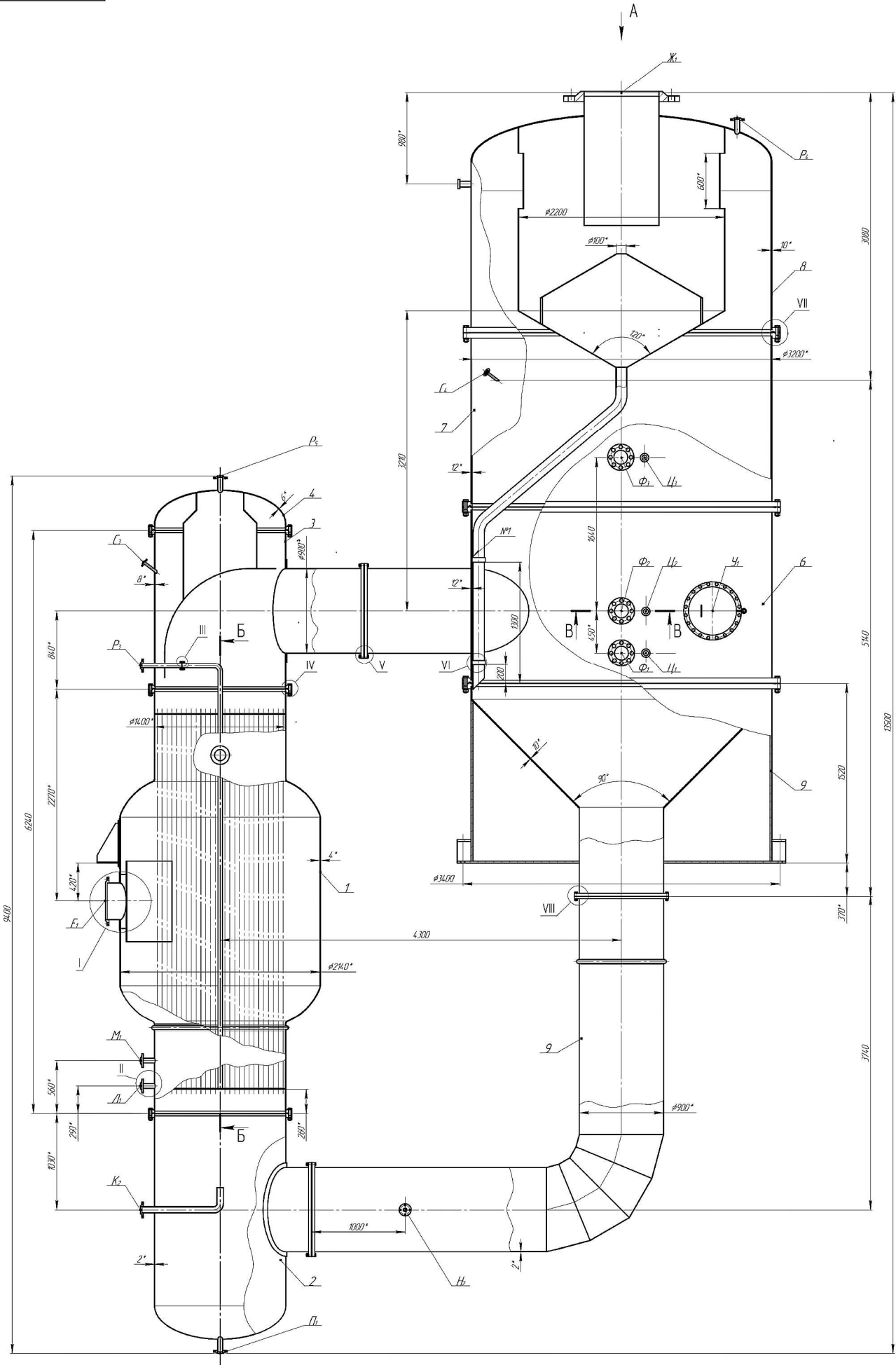
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Zaid S., Mohd Jaafar M. N., Tholudin M. Lazim, Shahrir A., Ammar F. Abdul Wahid Heat transfer enhancement in two-start spirally corrugated tube. Олександрійський інженерний журнал, 2015. Вип. 54, 415-422 с.
2. Махди Я. Ю., Бокарев Е. И., Бараков А. В. Экспериментальное исследование конвективного теплообмена и гидравлического сопротивления в криволинейном канале с кольцевыми турбулизаторами. Вестник Воронежского государственного технического университета, 2013. Том 1, №9, 138-140 с
3. Vicente P. G., Garc A., Viedma A. Experimental investigation on heat transfer and frictional characteristics of spirally corrugated tubes in turbulent flow at different Prandtl numbers. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2004. Vol. 47, 671–681 p.
4. Rainieri S., Bozzoli F., Cattani L. Passive techniques for the enhancement of convective heat transfer in single phase duct flow. Journal of Physics: Conference Series Italia, 2014. 1–10 p.
5. Письменный Е. Н., Рогачев В. А., Баранюк А. В., Семеняко А. В., Вознюк М. М. CFD-моделирование омыwania поверхности труб удобообтекаемой формы с неполным поперечным оречением. Международный научно-исследовательский журнал, 2014. №2 (21), 76 – 80 с.
6. Перцев Л. П., Ковалев Е. М., Фокин В. С. Трубочатые испарительные аппараты для кристаллизующих растворов, Пособие по проектированию М., 1982. – 70 с.
7. Плановський А. Н., Ніколаєв П. Н. Процеси і апарати хімічної і нафтохімічної технології: Навч. для вузів. - 3-йє изд., перераб. я доп. – М.: хімія, 1987. – 496 с.

8. Okabe M., Lies D., Kanamasa S. Park E.Y. Biotechnological production of itaconic acid and its biosynthesis in *Aspergillus terreus*. //Appl Microbiol Biotechnol. -2009. -V. 84. pp. 597-606.
9. Le Nôtre, J., Witte-van Dijk, S.C.M., van Haveren, J., Scott, E.L. et al. (2014) Synthesis of bio-based methacrylic acid by decarboxylation of itaconic acid and citric acid catalyzed by solid transitionmetal catalysts. ChemSusChem, 7, 2712–2720.
10. Bednarz, S., Fluder, M., Galica, M., Bogdal, D. et al. (2014) Synthesis of hydrogels by polymerization of itaconic acid-choline chloride deep eutectic solvent. J. Appl. Polym. Sci., 131.
11. Кулінченко, В. Р. Випарювання і випарні апарати у розрахунках і конструюванні : навч. посібник / В. Р. Кулінченко, В. Г. Мирончук. - К. : Кондор, 2006. - 392 с.
12. Обладнання технологічних процесів фармацевтичних та біотехнологічних виробництв : навч. посібн. / М.В. Стасевич, А. О. Милянйч, І. О. Гузьова [та ін.] ; за ред. В. П. Новікова. – Вінниця : Нова Книга, 2012. – 408 с.
13. Чернобыльский И. И. Машины и аппараты химической промышленности // Учебное пособие / Москва-Киев «Машгиз», 1962 – 524 с.
14. Thermal Kinetics. Factors to Consider During Evaporator Selection [Електронний ресурс] / Thermal Kinetics. – 2017. – Режим доступу до ресурсу: <https://thermalkinetics.net/choosing-an-evaporator-tips>.
15. Чепурний М. М. Розрахунки тепломасообмінних апаратів : навчальний посібник / М. М. Чепурний, С. Й. Ткаченко. – Вінниця : ВНТУ, 2006. – 129 с.
16. Остапчук Н. В. Основы математического моделирования процессов пищевых производств / К.: «ВИЩА ШКОЛА», 1991 – 367с.
17. Чернобыльский И. И. Выпарные установки. Вища школа, 1970. 244 с.
18. ГОСТ 5632-2014. Сталі висококоліговані і сплави коррозійностійкі, жаростійкі і жаропрочні // Маркі
19. Константинов С. М. Теплообмін [Текст] : підруч. для студентів вищ. техн. навч. закл. / Під ред. С. М. Константинов. – Політехніка : Інрес, 2005. 303 с.

20. Новый справочник химика и технолога. Сырье и продукты промышленности органических и неорганических веществ. Ч.II. – СПб.: АНО НПО «Профессионал», 2005, 2007. – 1142 с.
21. В. А. Смирнов. “Харчові кислоти (Лимонна, молочна, оцтова)”. Москва “Легка харчова промисловість” 1983. УДК 661.773.2/.3 + 661.734.1.
22. А. Ф. Платэ. Синтезы органических препаратов / пер. с англ. д-ра хим. наук А. Ф. Платэ, под ред. акад. Б. А. Казанского ; ред. амер. изд.: А. Блэтт (общ. ред.) , М.: Изд-во иностранной литературы., 1949. – 655 с.
23. Кичигин М.А., Костенко Г.Н. Теплообменные аппараты и выпарные установки. – М.-Л.: Энергия, 1955. – 392 с.
24. Михалева М. Ф. Расчет и конструирование машин и аппаратов химических производств // Примеры и задачи / ЛЭТИ – Л.: «Машиностроение», 1984 – 301с.
25. ДСТУ 8540:2015 Прокат листовой горячекатаный. Сортамент
26. ДСТУ 4738:2007/ГОСТ 2590-2006 Прокат сортовой стальной горячекатаный круглый. Сортамент (EN 10060:2003, NEQ; ГОСТ 2590-2006, IDT)
27. Дытнерский Ю. И. «Основные процессы и аппараты химической технологии: Пособие по проектированию/ Г. С. Борисов, В. П. Брыков, Ю. И. Дытнерский и ДР. под ред. Ю. И. Дытнерский, 2-е изд. М. Химия, 1996.– 496 с.
28. Анурьев В. И. Справочник конструктора-машиностроителя. В 3 т. Т. 1. - 8-е изд., перераб. и доп. Под ред. И. Н. Жестковой, - М. Машиностроение, 2001г.
29. Сталь вуглецева звичайної якості. Марки. ДСТУ 2651:2005/ГОСТ 380-2005). – [Чинний від 2005-01-01]. – К. : Державні стандарти України 2012. — 28 с. — (Національний стандарт України).
30. Лащинский А. А. «Конструирование сварных химических аппаратов»: Справочник. - Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1981. — 382 с., ил.
31. Стабніков В.Н., Лисянський В.М., Попов В.Д. Процеси і апарати харчових виробництв. - М.: Агропромиздат, 1986. - 509 с.
32. Фланцевые соединения: конструкции, размеры, расчёт на прочность : методические указания / сост. : В.Б. Коптева, А.А. Коптев. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2011. – 24 с. – 50 экз.

33. Болти з шестигранною головкою класа точності В. Конструкція і розміри : ДСТУ ГОСТ 7798:2008. – [Чинний від 2008-01-01]. – К. : Державні стандарти України 2012. — 9 с. — (Національний стандарт України).
34. Анурьев В. И. Справочник конструктора-машиностроителя. В 3 т. Т. 1. - 8-е изд., перераб. и доп. Под ред. И. Н. Жестковой, - М. Машиностроение, 2001г.
35. Павлов К. Ф., Романков П. Г. Носков А. А. «Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии. Учебное пособие для Вузов. Под ред.. Романова:Химия, 1987. 576с.,. ил.
36. Фарамазов С. А. Ремонт и монтаж химических и нефтеперерабатывающих заводов // Учебник для техникумов. Изд. 3-е / М.: «Химия», 1988 – 304с.
37. Розроблення стартап-проекту [Електронний ресурс] : Методичні рекомендації до виконання розділу магістерських дисертацій для студентів інженерних спеціальностей / За заг. ред. О.А. Гавриша. – Київ : НТУУ «КПІ», 2016. – 28 с.
38. Основи виробничого підприємництва: Навчальний посібник / під ред. Підлісної О.А., Янкового В.В. –К.: ІВЦ «Видавництво Політехніка», НТУУ «КПІ», 2010. –287 с



VIII (1:2)

Позначення	Найменування	Кіл.	Прохід умовний, мм	Тиск умовний, МПа	Примітки
E_1	Вхід гріючої пари	1	400	10	
X_1	Вихід вторинної пари	1	800	10	
K_{1-2}	Вхід розчину	2	65	10	
L_1	Вихід конденсату	1	50	10	
M_{1-2}	Для промивання	2	50	10	
H_{1-2}	Відбір проб	2	40	10	
P_1	Злиб	1	50	10	
P_{1-5}	Для з'єднання з атмосферою	5	50	10	
C_{1-4}	Гільза термометри	4	25	2,5	
T_1	Гільза манометру	1	25	16	
Y_{1-2}	Люк	2	500	0,6	
Φ_{1-6}	Вікно оглядове	6	150	10	
C_{1-6}	Для промивання оглядового вікна	6	20	10	
$Ш_1$	Гільза барометра	1	40	10	

Технічна характеристика

- | | |
|--|----------------------------|
| 1. Апарат призначений для упорядкування розчину ітаканової кислоти | |
| 2. Концентрація розчину, % (мас): | 15 |
| початкова | |
| кінцева | 65 |
| 3. Продуктивність, кг/с: | |
| по вихідному продукту | 2,89 |
| по кінцевому продукту | 0,667 |
| по випареній ділозі | 2,223 |
| 4. Площа поверхні теплообмін. м ² : | 250 |
| 5. Середовище у апараті: | |
| у сепараторі | розчин ітаканової кислоти, |
| | водяна пара |
| у міжтрубному просторі | насичена водяна пара |
| у трубному просторі | розчин ітаканової кислоти |
| 6. Тиск, МПа: | |
| у сепараторі | 0,08 |
| у міжтрубному просторі | 0,4 |
| у трубному просторі | 0,1 |
| 7. Температура, °С: | |
| у сепараторі | 94 |
| у міжтрубному просторі | 144 |
| у трубному просторі | 102 |
| 8. Габаритні розміри, мм: | |
| довжина | 7490 |
| ширина | 3520 |
| висота | 13500 |
| 9. Маса, кг: | 15000 |

Технічні вимоги

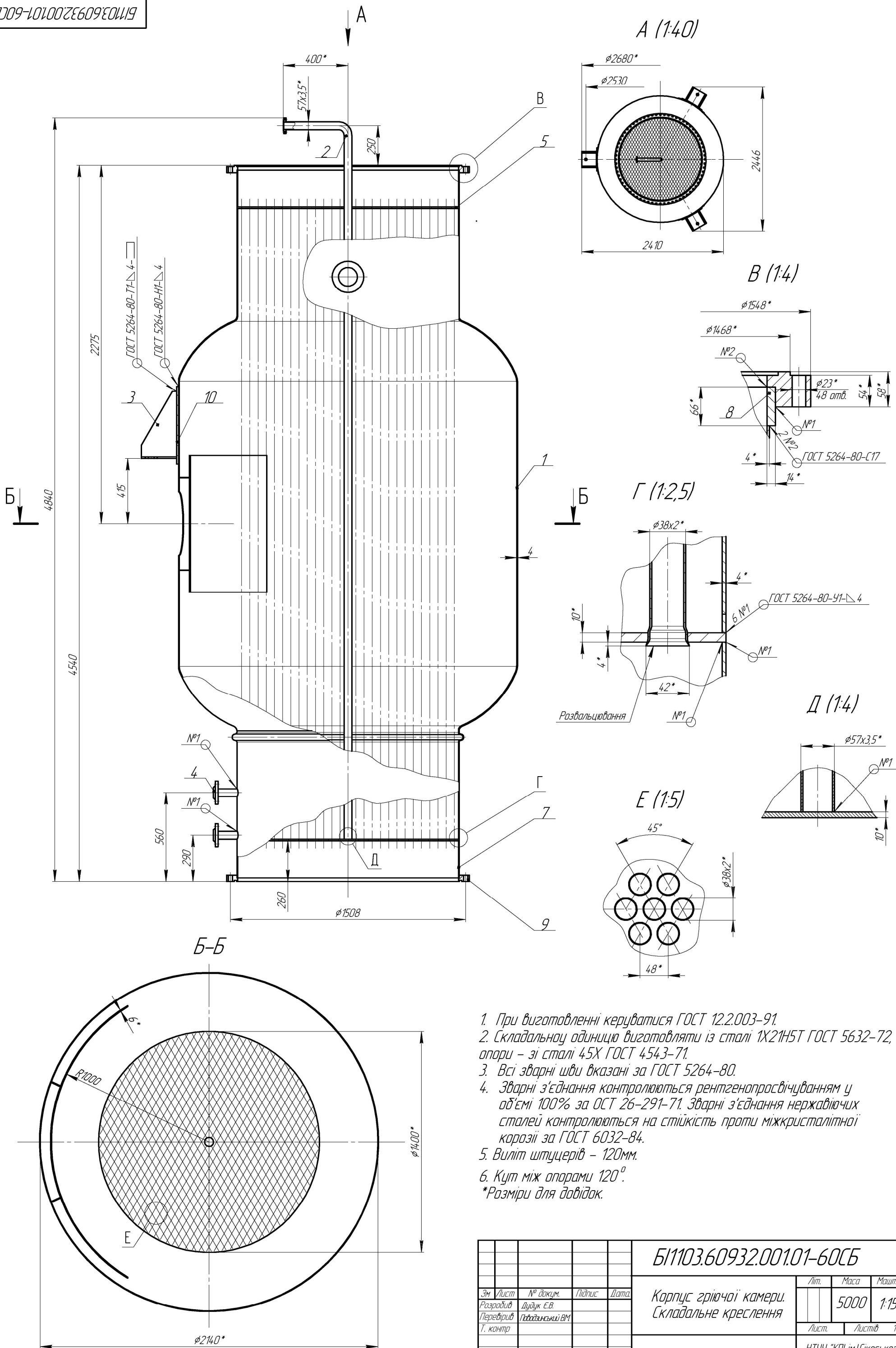
1. При виготовленні апарату керуватись ГОСТ 12.2.003-91.
 2. Корпус апарату та деталі, що контактують з різними, який улаштується виготовляти із сталі 1Х21Н5Т ГОСТ 5632-72, опори – зі сталі 45Х ГОСТ 454-71, інші деталі – зі сталі 3 ІСТУ 2651:2005 (ГОСТ 380-2005).
 3. Зварні шви виказати за ГОСТ 5264-80.
 4. Зв'язи з'єднання контролюються рентгенографічним методом у об'ємі 100% за ГОСТ 26-297-71. Зварні з'єднання нерухливих сталець контролюються на стійкість проти міжкристалітної корозії за ГОСТ 6032-84.
 5. Витяг шпунцерів 120мм.
 6. Ліміри розташування шпунцерів, опор, оглядових вікон відбуди на вигляді А.
- *Додати для додаток.*

						Б/1103.60932.001.00-60СБ			
						Вспарный аппарат с выносной звонячей камерой. (кладальные кресления.	Лист	Масса	Маштаб
								15000	1:20
							Лист	Листов	1
Эк	Лист	№ докум.	Подпис	Дата			НТУУ "КИ" ім. І.Сікорського" ФБТ, БІ-11мп		
Разработ		Лудук Е.В.							
Перебери		Григорьевский ВМ							
Т. контр									
Н контр		Григорьевский ВМ							
Затвердил		Мельник ВМ							

Умовне позначення		Найменування середовища в трубопроводі
Літерне	Графічне	
T11		Вода технічна холодна
T12		Вода технічна гаряча
T2		Пара
T30		Січні води

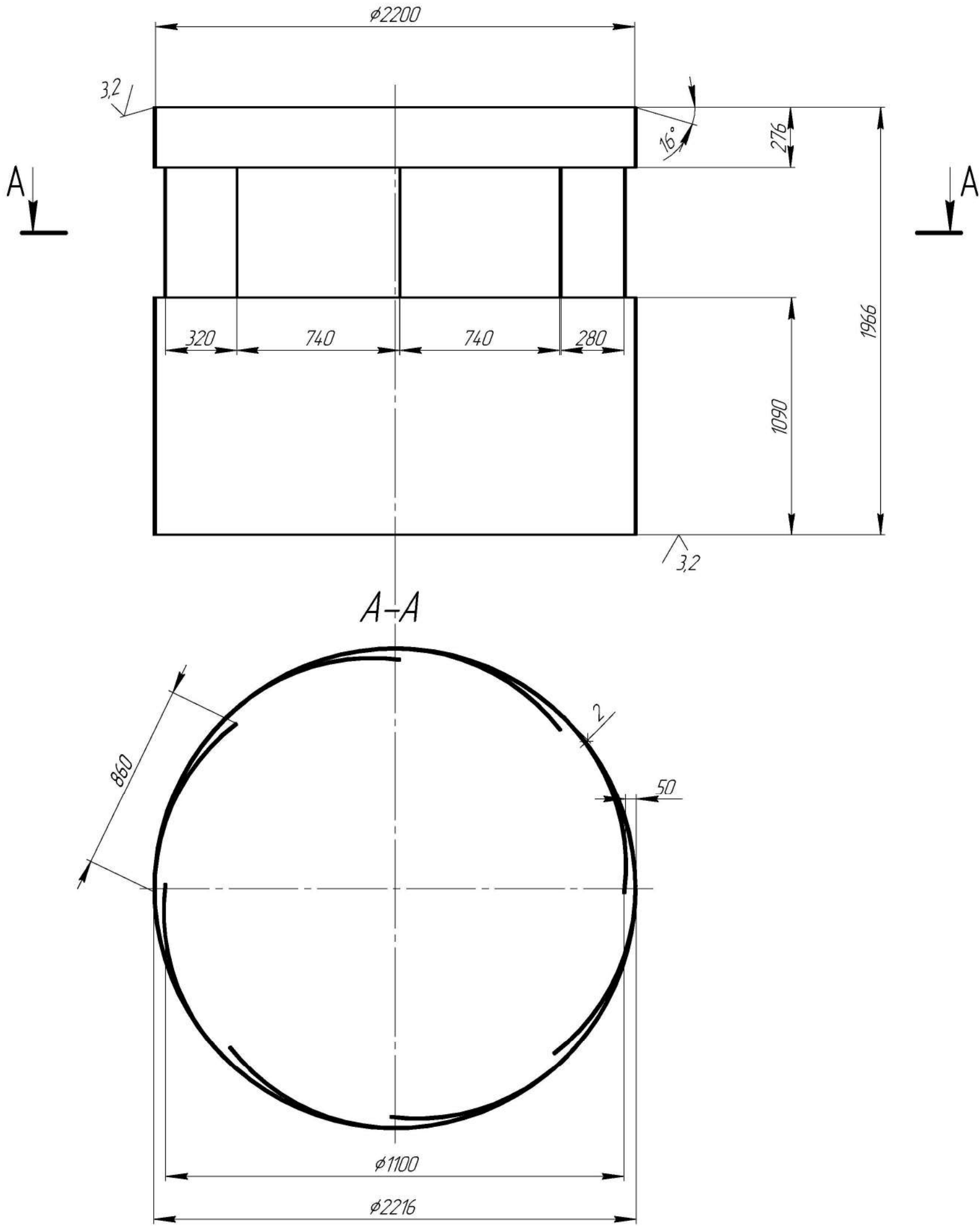
Позначення	Найменування	Кільк.	Примітка
P1	Реактор-нейтралізатор	1	
З82	Збірник вапняного молочка	1	
Д3	Дозатор об'ємно-ваговий	1	
Н4	Насос для перекачування цитратної суспензії	1	
К5	Конденсатодвідвідник	1	
Ф6	Фільтр-прес ФІТАК-М для виділення цитрату	1	
Н7	Насос для повернення відстояного цитрату в нейтралізатор	1	
З88	Збірник фільтрату	1	
Н9	Насос для перекачування фільтрату на концентрування	1	
З810	Збірник фільтрату	1	
Р11	Реактор для обробки кальцевої солі сірчаною кислотою	1	
З812	Збірник сірчаної кислоти	1	
З813	Збірник гексаціаніформату кальцію	1	
Д14	Дозатор об'ємно-ваговий	1	
Ф15	Фільтр спірально-ковшовий для відділення гіпсового шлам	1	
З816	Вакуум-збірник розчину ітаканової кислоти	1	
Н17	Насос для перекачування розчину ітаканової кислоти	1	
З818	Збірник розчину після першого випарювання	1	
В19	Апарат випарний вакуумний з відносною грюною камерою	1	
Р20	Реактор для освітлення ітаканової кислоти вугільним окислювачем	1	
К21	Конденсатор барометричний	1	
К22	Конденсатодвідвідник	1	
Ф23	Фільтр дисковий для відділення гіпсу	1	
З824	Збірник фільтрату	1	
Н25	Насос нерегульований	1	
З826	Збірник розчину	1	
В27	Апарат випарний вакуумний з відносною грюною камерою	1	
З828	Збірник упареного розчину ітаканової кислоти	1	
К29	Конденсатодвідвідник	1	
Кр30	Кристалізатор	1	
Ц31	Центрифуга	1	
Е32	Елеватор шнековий	1	
З833	Збірник першого маточного розчину	1	
Е34	Сушарка барабанна	1	
Е35	Елеватор шнековий	1	
Ст36	Сито вібраційне з підтримним охолодженням кристалів ітаканової кислоти	1	
З837	Збірник готового продукту	1	

						Б1103.60932.002.00-60АС		
					Апаратурно-технологічна схема виділення та очистки тананового кислот	Лист	Маса	Наматів
Зн	Дист	№ докум	Підпис	Дата		Арк	Арк	1
Розроб	Дудж ЄВ					НТУУ "КПІ ім. Ігоря Сікорського" ФБТ, БІ-11м		
Перевір	Товбінський ВМ							
Т. контр								
Н. контр	Товбінський ВМ							
Затверд	Мельник ВМ							



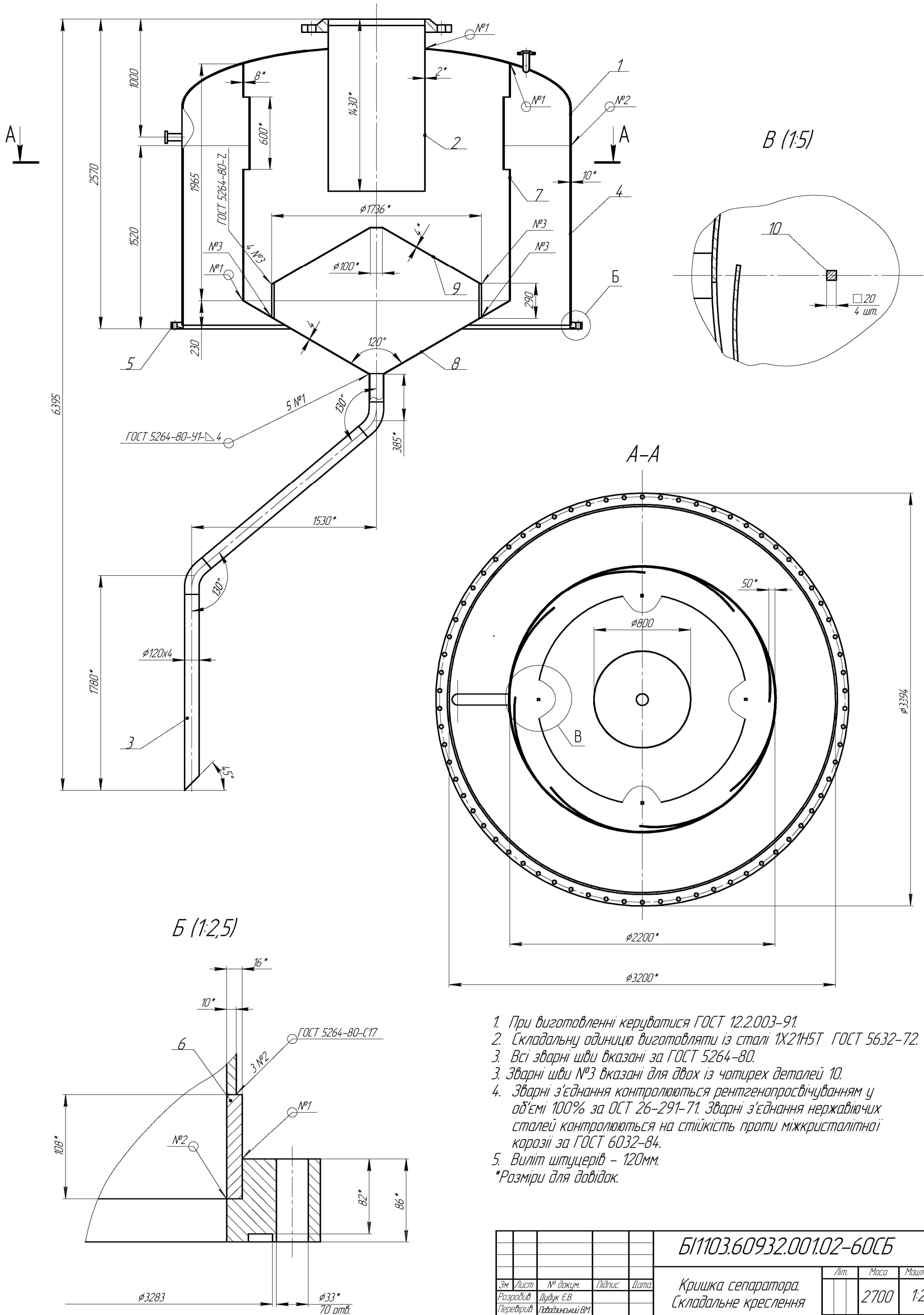
1. При виготовленні керуватися ГОСТ 12.2.003-91.
 2. Складальну одиницю виготовляти із сталі 1Х21Н5Т ГОСТ 5632-72, опори – зі сталі 45Х ГОСТ 4543-71.
 3. Всі зварні шви вказані за ГОСТ 5264-80.
 4. Зварні з'єднання контролюються рентгенопросвічуванням у об'ємі 100% за ОСТ 26-291-71. Зварні з'єднання нержавіючих сталей контролюються на стійкість проти міжкристалітної корозії за ГОСТ 6032-84.
 5. Виліт штуцерів – 120мм.
 6. Кут між опорами 120°.
- *Разміри для довідок.

Б1103.60932.001.01-60СБ					
Зм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	Корпус гріючої камери. Складальне креслення
Разробив	Дудук Є.В.				
Перевірив	Григоренко В.М.				
Т. контр					
Н. контр	Григоренко В.М.				Лит. Маса Маштаб
Затвердив	Мельник В.М.				
					Лист. 1
					НТУУ "КПІ ім. І.Сікорського" ФБТ, БІ-11/м

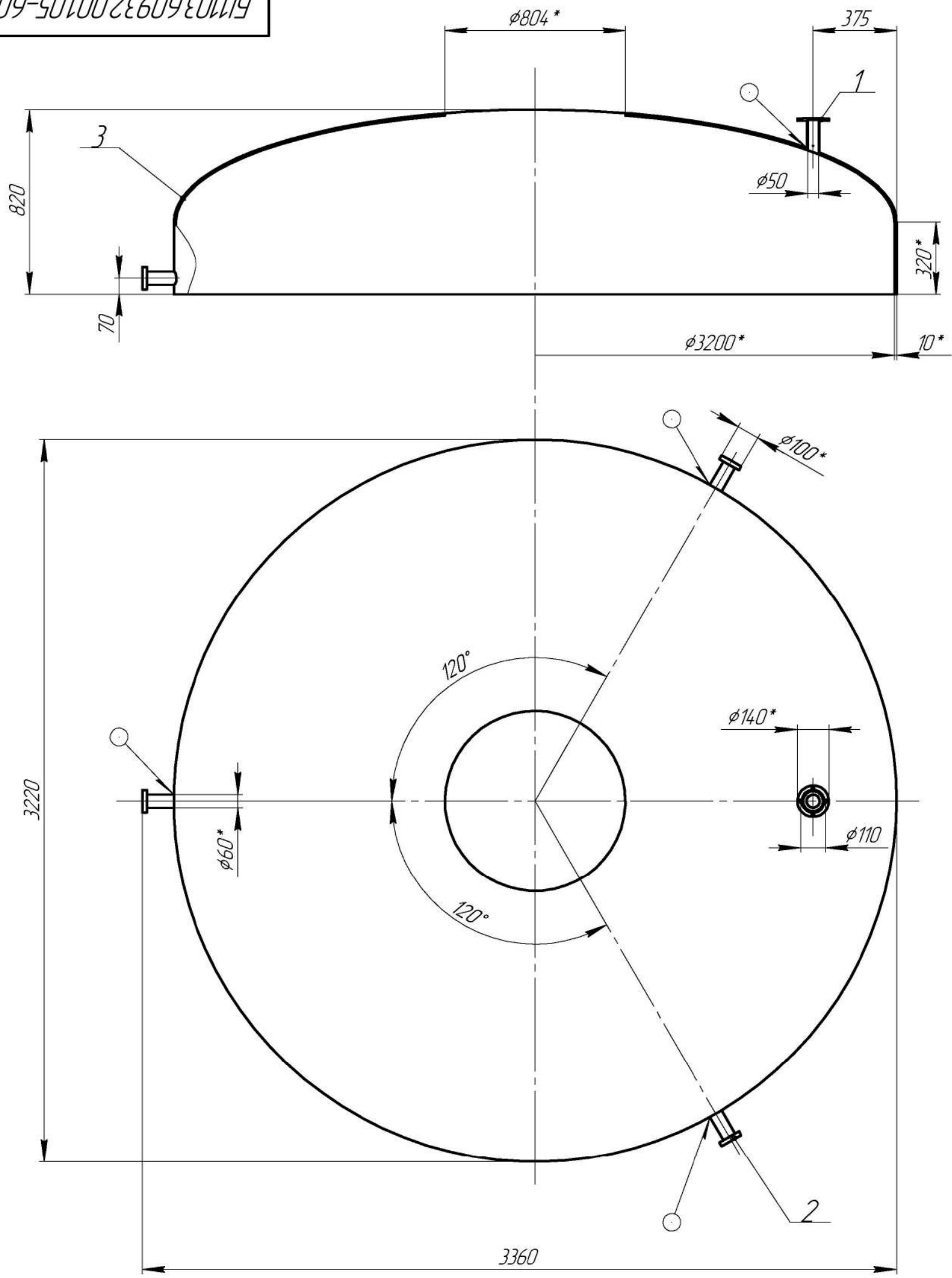


1. При виготовленні деталі керуються ГОСТ 12.2.003-91.
2. Невказані граничні відхилення розмірів отворів Н14, і всі інші +IT 14/2.
3. Зварні з'єднання контролюються рентгенопросвічуванням у об'ємі 100% за ОСТ 26-291-71.

БІ1103.60932.001.06-60СБ					Корпус бризкоуловлювача		
Зм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	Літ.	Маса	Маштаб
Розробив	Дудук Е.В.					1210	1:20
Перевірив	Паводзинський В.М.				Лист.	Листів	1
Т. контр					НТУУ "КПІ ім.І.Сікорського"		
Н. контр	Паводзинський В.М.				ФБТ, БІ-11мл		
Затвердив	Мельник В.М.				Лист 6970x1966x4 ГОСТ 19904-90		
					Сталь 1Х21Н5Т ГОСТ 5632-72		

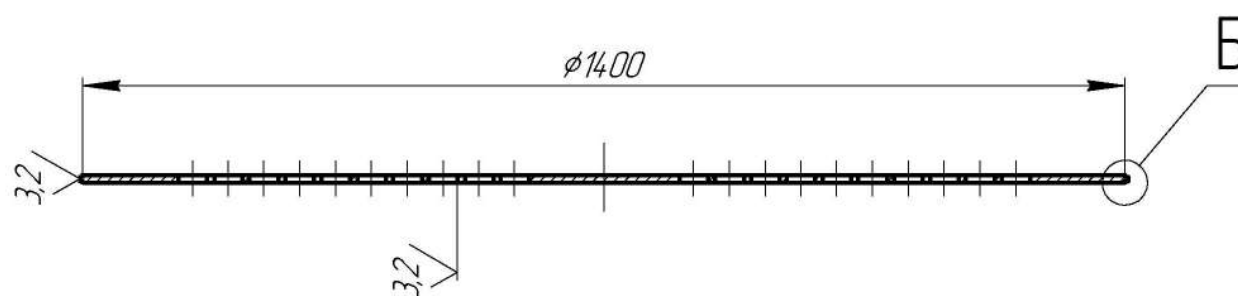
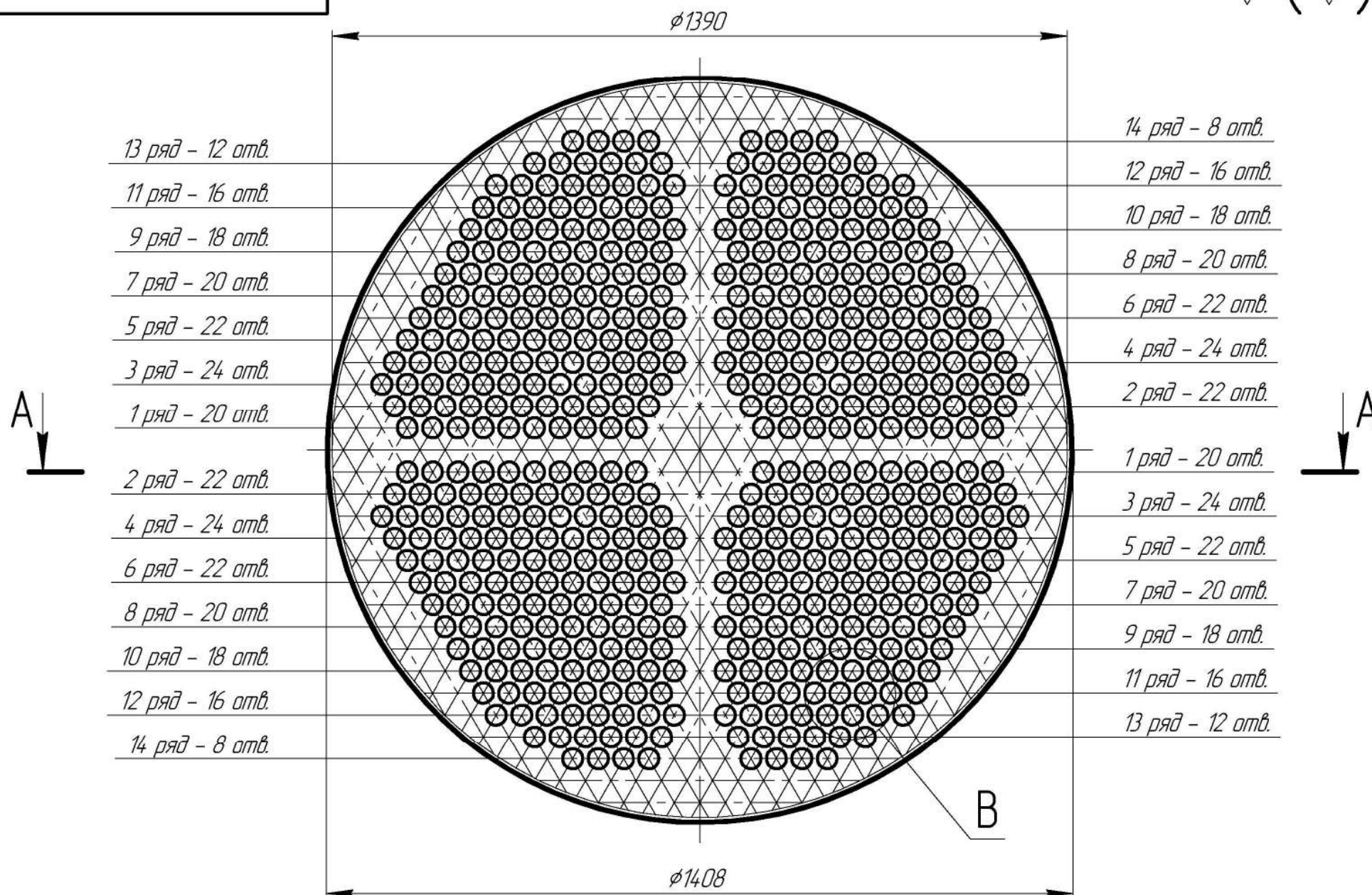


БІ1103.60932.001.02-60СБ				Кришка сепаратора. Складальне креслення		
Зм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	Літ.	Маса
Разробив	Дудук Е.В.					2700
Перевірив	Головизинський ВМ					1:20
Т. контр					Лист	Листів 1
Н. контр	Головизинський ВМ				НТУУ "КПІ ім.І.Сікарського"	
Затвердив	Мельник В.М.				ФБТ, БІ-11м	

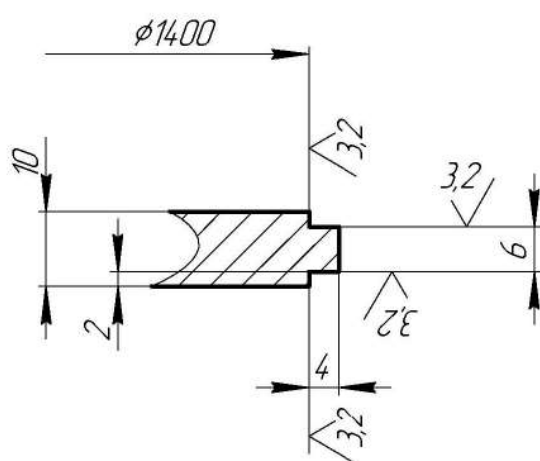


1. При виготовленні керватися ГОСТ 12.2.003-91.
2. Складальну одиницю виготовляти із сталі 1Х21Н5Т ГОСТ 5632-72.
3. Всі зварні шви вказані за ГОСТ 5264-80-У1-4. 4 шви.
4. Виліт штуцерів – 120мм.
*Розміри для довідок.

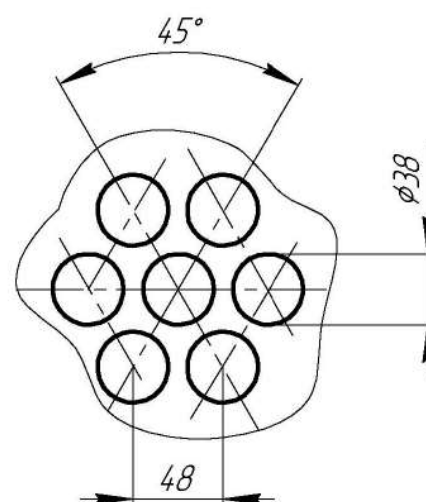
Б1103.60932.001.05-60СБ					Кришка. Складальне креслення		
					Літ.	Маса	Маштаб
						2400	1:20
					Лист.	Листів	1
					НТУУ "КПІ ім.І.Сікорського" ФБТ, БІ-11мп		
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата			
Розробив		Дудук Е.В.					
Перевірив		Говодзинський ВМ					
Т. контр							
Н. контр		Говодзинський ВМ					
Затвердив		Мельник ВМ.					



Б (1:1)

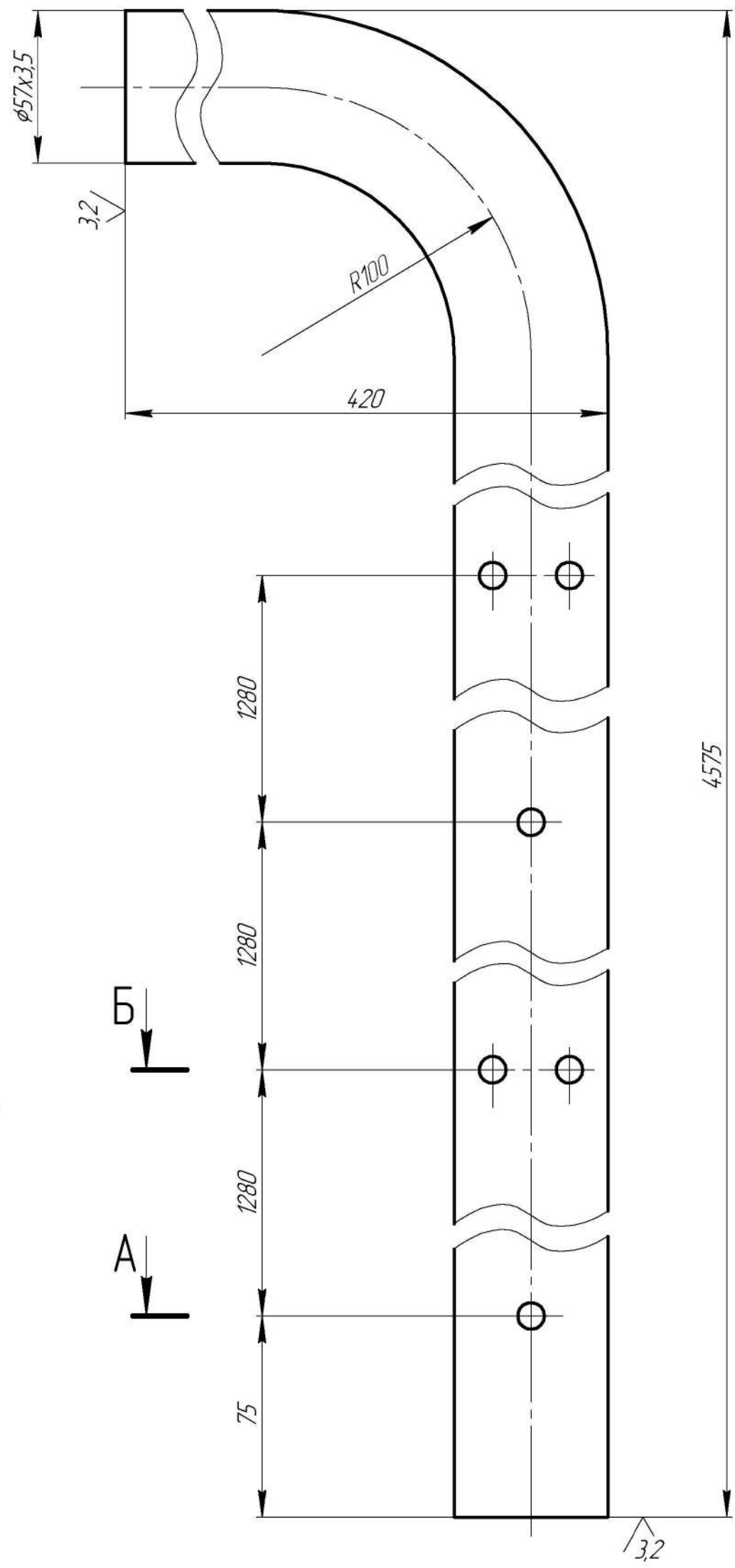
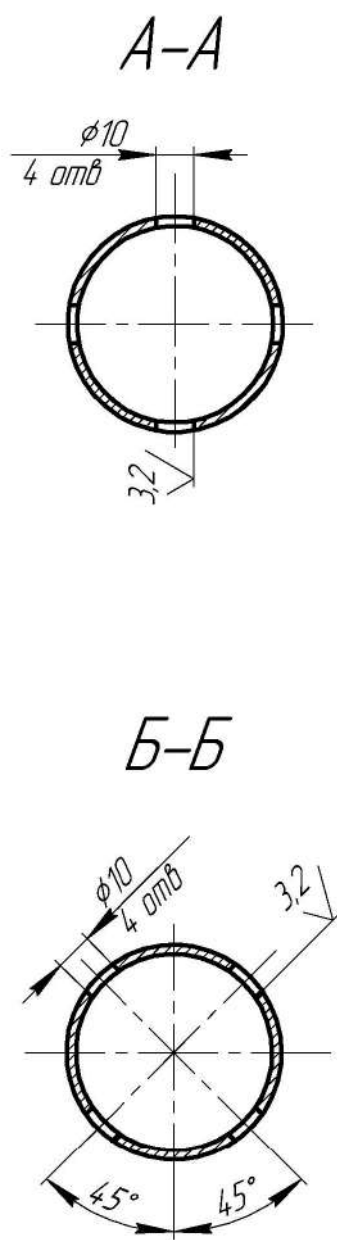


Б (1:5)



1. При виготовленні деталі керуються ГОСТ 12.2.003-91.
2. Термообробка- Нормалізація 170-190 НВ.
3. Невказані граничні відхилення розмірів отворів Н14, і всі інші +IT 14/2.

					БІ1103.60932.001.03-60СБ				
					Решітка трудна	Лит.	Маса	Маштаб	
Зм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата					
Розробив	Дудук Є.В.						84	1:10	
Перевірив	Паводинський ВМ								
Т. контр						Лист.	Листів	1	
Н. контр	Паводинський ВМ				Лист	НТУУ "КПІ ім.І.Сікорська"			
Затвердив	Мельник ВМ					ФБТ, БІ-11мп			
					1408x10 ГОСТ 19904-90				
					Сталь 1Х21Н5Т ГОСТ 5632-72				



1. При виготовленні деталі керуються ГОСТ 12.2.003-91.
2. Невказані граничні відхилення розмірів отворів Н14, і всі інші +IT 14/2.
3. Розташування отворі зображене на розрізах А-А і Б-Б дублюється через 2360мм.

БІ1103.60932.001.04-60СБ					Труба вентиляційна		
Зм	Лист	№ док-м.	Підпис	Дата	Лит.	Маса	Маштаб
Розробив	Дудук Є.В.					90	1:2
Перевірив	Пободзинський ВМ				Лист.	Листів	1
Т. контр					Труба Ø57x3.5x5250 Гост 8731-74 Сталь 1Х21Н5Т		
Н. контр	Пободзинський ВМ				НТУУ "КПІ ім.І.Сікорського" ФБТ БІ-11мп		
Затвердив	Мельник В.М.						

Перв. застосує.		Формат	Зона	Поз.	Позначення	Найменування	Кіл.	Примітка
						Документація		
		АО			БІ1103.60932.001.00-60СБ	Складальне креслення	1	
						Складальні одиниці		
		БК		1	БІ1103.60932.001.01-60	Корпус зріючої камери	1	
		БК		2	БІ1103.60932.001.02-60	Днище зріючої камери	1	
		БК		3	БІ1103.60932.001.03-60	Царга зріючої камери	1	
		БК		4	БІ1103.60932.001.04-60	Кришка зріючої камери	1	
		БК		5	БІ1103.60932.001.05-60	Днище сепаратора	1	
		БК		6	БІ1103.60932.001.06-60	Царга сепаратора нижня	1	
		БК		7	БІ1103.60932.001.07-60	Царга сепаратора верхня	1	
		БК		8	БІ1103.60932.001.08-60	Кришка сепаратора	1	
		БК		9	БІ1103.60932.001.09-60	Труба циркуляційна	1	
						Деталі		
		БК		10	БІ1103.60932.001.10-60	Фіксуюче кільце	2	
						Стандартні вироби		
				11		Болт М14х55		
						ГОСТ 15589-70	4	
				12		Болт М20х110		
						ГОСТ 15589-70	93	
				13		Болт М20х140		
						ГОСТ 15589-70	144	
					БІ1103.60932.001.00-60СБ			
		Зм.	Арк.	№ док-м	Підп.	Дата		
		Разроб.	Дудук Е.В.			Випарний апарат з виносною зріючою камерою		
		Перев.	Поводзинський ВМ					
		Н. контр.	Поводзинський ВМ			Літ. Аркуш Аркушів 1 2		
		Затв.	Мельник В.М.					
Інв. № ориг.		НТУУ "КПІ ім.І.Сікорського" ФБТ, БІ-11мп						

[illegible]

[illegible]

Перв. застосує.		Довід. №		Підп. і дата		Взам. інв. №		Інв. № дідл.		Підп. і дата		Формат	Зона	Поз.	Позначення	Найменування	Кіл.	Примітка
																Документація		
																Складальне креслення	1	
																Складальні одиниці		
														1		Штуцер	1	
														2		Цапфа	3	
																Деталі		
														3		Еліптична обичайка	1	