

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

**Факультет автоматизації, промислової інженерії та екології
Кафедра машин та апаратів хімічних і нафтопереробних виробництв**

ДО ЗАХИСТУ ДОПУЩЕНО
Завідувач кафедри МАХНВ
_____ Андрій СТЕПАНЮК
“ _____ ” _____ 2026 р.

Дипломний проєкт

**на здобуття ступеня бакалавра
за освітньо-професійною програмою «Комп’ютерно-інтегровані
технології проектування обладнання хімічної інженерії»
спеціальності 133 «Галузеве машинобудування»**

на тему: «Модернізація дефлегматора установки алкілування бензолу»

Виконав:

студент IV курсу, групи ЛН-21
Антончик Євгеній Євгенійович _____

Керівник:

Ст. викладачка, к.т.н., ст. науковий співробітник, д.т.н.
Коник Аліна Василівна _____

Консультант з охорони праці:

Старший викладач кафедри ОПЦБ, канд. техн. наук
Ковтун Андрій Іванович _____

Консультант з економіки:

Старша викладачка кафедри МАХНВ, канд. техн. наук
Гусарова Олена Віталіївна _____

Рецензент:

(посада, науковий ступінь, вчене звання)

(прізвище, ім’я, по батькові)

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

Студент _____

Київ – 2026

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

**Факультет автоматизації, промислової інженерії та екології
Кафедра машин та апаратів хімічних і нафтопереробних виробництв**

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність: 133 Галузеве машинобудування

Освітньо-професійна програма: Комп'ютерно-інтегровані технології проектування обладнання хімічної інженерії

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри МАХНВ

_____ Андрій СТЕПАНЮК

“ ____ ” _____ 2026 р.

ЗАВДАННЯ

на дипломний проєкт студенту

Антончик Євгеній Євгенійович

1. Тема проєкту: Модернізація дефлегматора установки алкілування бензолу

Керівник проєкту: Ст. викладачка, к.т.н., ст. науковий співробітник, д.т.н.
Коник Аліна Василівна.

Затверджені наказом по університету від « ____ » _____ 2026 р. № _____

2. Термін подання студентом проєкту: 18 червня 2026 р.

3. Вихідні дані до проєкту: Спроектувати дефлегматор установки алкілування бензолу. Продуктивність за парою бензолу 3 кг/с. Тиск води в трубному просторі 0,1 МПа; в міжтрубному просторі 0,12 МПа; температура парів бензолу 85°C, температура води на вході 20°C, температура води на виході 65°C.

4. Зміст пояснювальної записки: а) основна частина: обґрунтувати вибір конструкцій; виконати розрахунки, що підтверджують працездатність та надійність конструкцій, а саме: технологічний, параметричний розрахунки, розрахунки на міцність і надійність елементів дефлегматора;

б) охорона праці: провести аналіз відповідності апарата до вимог охорони праці, викласти основні вимоги безпечної експлуатації апарата;

в) економічна частина: обґрунтувати модернізацію установки та оцінити її ефективність;

г) навести рекомендації щодо монтажу та експлуатації апарата;

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень, плакатів, презентацій тощо): технологічна схема – А1, дефлегматор складальний кресленик – А1, корпус складальний кресленик – А1, кресленик складальний опорної лапи– А3, розподільча камера складальний кресленик – А3, кришка складальний кресленик – А3, трубна решітка – А3 та відповідні специфікації до складальних креслень – А4, модернізація – А3, 3д модель апарата – А3.

6. Консультанти розділів проекту:

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці	Андрій КОВТУН старший викладач, к.т.н.		
Техніко-економічне обґрунтування доцільності вдосконалення	Олена ГУСАРОВА старша викладачка, к.т.н.		

7. Дата видачі завдання: 20 квітня 2026 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проекту	Строк виконання етапів проекту	Примітка
1	2	3	4
1	Узгодження теми, вихідних даних, визначення джерел інформації. Обґрунтування актуальності проекту.	22.04.26	

1	2	3	4
2	Патентне дослідження. Формування змісту модернізації (на основі зміни технологічної схеми, конструкції апарата, його елементів, речовин).	25.04.26	
3	Опис установки. Схема установки. Вибір і опис конструкції. Технічна характеристика установки, апарату. Вибір матеріалів.	25.04.26	
4	Параметричний розрахунок: визначення основних розмірів апарату.	20.05.26	
5	Розробка складальних креслеників апарату і його складальних одиниць.	25.05.26	
6	Розрахунки на міцність. Розробка алгоритмів та програм розрахунку.	26.05.26	
7	Уточнення графічної частини проекту та специфікацій.	26.05.26	
8	Обґрунтування економічної доцільності модернізації.	31.05.26	
9	Розробка вимог до апарата з питань охорони праці.	01.06.26	
10	Оформлення пояснювальної записки. Перевірка відповідності проекту діючим нормам за змістом і оформленням. Підготовка до захисту. Складення плану викладення доповіді, окремих питань.	03.06.26	
11	Попередній захист проекту.	14.06.26	
12	Корегування проекту за результатами попереднього захисту. Отримання рецензії, відзиву. Підготовка до захисту.	14.06.26	

Студент

_____ Свгеній АНТОНЧИК
(підпис)

Керівник проекту

_____ Аліна КОНИК
(підпис)

РЕФЕРАТ

УДК 66.081

Модернізація дефлегматора установки алкілування бензолу : Дипломний проєкт освітнього ступеня «Бакалавр» / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; керівник А. В. Коник. – Київ, 2026. – 128 с. : іл. Викон. – Є. Є. Антончик. – Бібліогр.: с. 96.

Пояснювальна записка складається зі вступу, 8 розділів, висновків, переліку посилань із 44 найменувань. Загальний обсяг роботи становить 96 сторінки, містить 15 рисунків, 9 таблиць та 4 додатки.

Метою проєкту є модернізація дефлегматора установки алкілування бензолу, спрямована на підвищення ефективності процесів тепло- та масообміну, надійності роботи обладнання, зниження енергетичних витрат та забезпечення стабільності технологічного режиму. Удосконалення конструкції апарата дозволяє підвищити ефективність конденсації парів, покращити розділення компонентів технологічної суміші та забезпечити покращення техніко-економічних показників виробництва.

Для досягнення поставленої мети виконано аналіз технологічного процесу алкілування бензолу та визначено місце дефлегматора в технологічній схемі установки. Проведено патентний пошук і аналіз існуючих конструкцій тепло- та масообмінного обладнання, обґрунтовано вибір конструкції модернізованого апарата. Виконано комплекс розрахунків, що підтверджують працездатність та надійність конструкції, зокрема параметричний, тепловий, гідравлічний та конструктивний розрахунки, а також розрахунки на міцність основних елементів апарата: циліндричної обичайки, еліптичних днищ, трубної решітки, штуцерів, теплообмінних труб і опорних лап та розрахунок напружень з урахуванням крайових навантажень. Розроблено рекомендації щодо монтажу, експлуатації та технічного обслуговування дефлегматора.

У роботі проведено оцінку рівня стандартизації та уніфікації конструкції, виконано техніко-економічне обґрунтування запропонованої модернізації, а також аналіз відповідності конструкції вимогам охорони праці, промислової та пожежної безпеки. За результатами виконаної роботи сформульовано висновки щодо ефективності модернізації та перспектив її впровадження у виробництво.

Графічна частина дипломного проєкту включає такі креслення як: технологічна схема – А1, дефлегматор складальний кресленик – А1, корпус

складальний кресленик – А1, кресленик складальний опорної лапи– А3, розподільча камера складальний кресленик – А3, кришка складальний кресленик – А3, трубна решітка – А3 та відповідні специфікації до складальних креслень – А4, модернізація – А3, 3д модель апарата – А3.

ДЕФЛЕГМАТОР, АЛКІЛУВАННЯ БЕНЗОЛУ, ТЕПЛО- ТА МАСООБМІН, КОЖУХОТРУБНИЙ ТЕПЛООБМІННИК, ТЕПЛОВИЙ РОЗРАХУНОК, ГІДРАВЛІЧНИЙ РОЗРАХУНОК, МОДЕРНІЗАЦІЯ ОБЛАДНАННЯ.

.

ABSTRACT

UDK 66.081

Modernization of the dephlegmator of the benzene alkylation unit: Diploma project for the degree of Bachelor / Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute; supervisor A. V. Konyk. – Kyiv, 2026. – 128 p. : ill. Executor – E. E. Antonchyk. – Bibliography: p. 96.

The explanatory note consists of an introduction, 8 chapters, conclusions, a list of references with 44 titles. The total volume of the work is 96 pages, contains 15 figures, 9 tables and 4 appendices.

The purpose of the project is to modernize the dephlegmator of the benzene alkylation unit, aimed at increasing the efficiency of heat and mass transfer processes, reliability of equipment operation, reducing energy costs and ensuring the stability of the technological regime. Improving the design of the apparatus allows to increase the efficiency of vapor condensation, improve the separation of components of the technological mixture and ensure the improvement of technical and economic indicators of production.

To achieve the set goal, an analysis of the technological process of alkylation of benzene was performed and the place of the reflux condenser in the technological scheme of the installation was determined. A patent search and analysis of existing designs of heat and mass exchange equipment were conducted, and the choice of the design of the modernized apparatus was justified. A set of calculations was performed that confirm the operability and reliability of the design, in particular parametric, thermal, hydraulic and structural calculations, as well as calculations of the strength of the main elements of the apparatus: a cylindrical shell, elliptical bottoms, pipe grid, fittings, heat exchange pipes and support legs and calculation of stresses taking into account edge loads. Recommendations for the installation, operation and maintenance of the reflux condenser were developed.

The work assessed the level of standardization and unification of the design, performed a feasibility study of the proposed modernization, and analyzed the compliance of the design with the requirements of labor protection, industrial and fire safety. Based on the results of the work, conclusions were formulated regarding the effectiveness of the modernization and the prospects for its implementation in production.

The graphic part of the diploma project includes the following drawings: technological scheme - A1, reflux condenser assembly drawing - A1, housing assembly drawing - A1, support leg assembly drawing - A3, distribution chamber assembly drawing - A3, cover assembly drawing - A3, pipe grid - A3 and corresponding specifications for assembly drawings - A4, modernization - A3, 3D model of the apparatus - A3.

DEPHLEGMATOR, BENZENE ALKYLATION, HEAT AND MASS EXCHANGE, SHELL-TUBE HEAT EXCHANGER, THERMAL CALCULATION, HYDRAULIC CALCULATION, EQUIPMENT MODERNIZATION.

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

**Факультет автоматизації, промислової інженерії та екології
Кафедра машин та апаратів хімічних і нафтопереробних виробництв**

**ДИПЛОМНИЙ ПРОЄКТ
на здобуття ступеня бакалавра**

Спеціальність: 133 Галузеве машинобудування

Освітня програма: Комп'ютерно-інтегровані технології проектування
обладнання хімічної інженерії

на тему: Модернізація дефлегматора установки алкілування бензолу

Київ – 2026

ЗМІСТ

Вступ.....	14
1 Призначення та область застосування апарата.....	18
1.1 Опис технологічного процесу.....	18
1.2 Вибір типу підігрівача і його місце в технологічній схемі.....	21
2 Технічна характеристика підігрівача.....	23
3 Опис та обґрунтування вибраної конструкції апаратів.....	24
3.1 Опис конструкції, основних складальних одиниць та деталей апарата.....	24
3.2 Опис модернізації апарата	26
3.3 Вибір матеріалів	29
3.4 Порівняння основних показників розробленої конструкції підігрівача з аналогами	30
3.5 Патентне дослідження	37
4 Охорона праці.....	46
5 Розрахунки, що підтверджують працездатність та надійність конструкцій ..	53
5.1 Визначення основних геометричних розмірів апарата.....	53
5.2 Розрахунок штуцерів	60
5.3 Гідравлічний розрахунок.....	62
5.4 Розрахунок товщини стінки циліндричної обичайки.....	64
5.5 Розрахунок еліптичного днища	66
5.6 Розрахунок опорних лап.....	68
5.7 Розрахунок трубних решіток на міцність.....	71
5.8 Розрахунок труб на міцність, стійкість і жорсткість труб у решітці.....	75
5.9 Розрахунок напружень з урахуванням крайових навантажень.....	77
6 Рекомендації з монтажу та експлуатації апарата	83

Відповідальна організація МАХНВ	Технічне узгодження: НОВОХАТ	Вид документа Пояснювальна записка	Статус документа опублікований			
Власник документа КПІ ім. Ігоря Сікорського	Розробник документа: АНТОНЧИК	Назва, додаткова назва Модернізація дефлегматора установки алкілування бензолу	ЛН21.01.101.001 ПЗ			
	Документ затверджено: КОНИК		Інд.змін.	Дата видання	Мова UA	Аркуш 10

7 Рівень стандартизації та уніфікації	86
8 Техніко-економічне обґрунтування модернізації.....	88
Висновки	93
Conclusions	95
Перелік посилань	97
Додаток А Документація до патентного дослідження.....	103
Додаток Б Програмний розрахунок елемента апарата.....	108
Додаток В Патенти, які використані в патентному дослідженні.....	112
Додаток Г Публікації автора.....	117

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА ТЕРМІНІВ

D – діаметр апарата, м;

F – площа поверхні теплообміну, м^2 ;

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

G – масова витрата, $\text{кг}/\text{с}$;

n – кількість труб;

p – тиск, Па ;

Q – кількість переданої теплоти, Вт ;

S – площа поперечного перерізу, м^2 ;

$t_{1\text{к}}$ – кінцева температура теплоносія, К ($^{\circ}\text{C}$);

$t_{1\text{п}}$ – початкова температура теплоносія, К ($^{\circ}\text{C}$);

Δt_6 – менша різниця температур на кінцях теплообмінника, $^{\circ}\text{C}$;

$\Delta t_{\text{м}}$ – менша різниця температур на кінцях теплообмінника, $^{\circ}\text{C}$;

$\Delta t_{\text{сер}}$ – середня різниця температур, $^{\circ}\text{C}$;

$t_{\text{пл}}$ – температура плівки конденсату, К ($^{\circ}\text{C}$);

z – кількість ходів;

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

δ – товщина стінки труби, м;

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

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

ν – коефіцієнт кінематичної в'язкості, $\text{м}^2/\text{с}$;

ρ – густина, $\text{кг}/\text{м}^3$;

C – теплоємність, $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$

E – модуль пружності, МПа ;

φ – коефіцієнт зварного шва;

b_4 – ширина плити основи опорної лапи, а також ширина кільця жорсткості, м;

b_2 – ширина підкладного листа, м;

g – відстань між середніми лініями ребер, м;

h_1 – висота опорної лапи, м;

C – додаток до розрахункової товщини, м;

δ – товщина стінки труби, м;

μ - коефіцієнт Пуассона.

.

Вступ

Сучасна хімічна та нафтохімічна промисловість характеризується високим рівнем енергоємності та складністю технологічних процесів, що потребують ефективного тепло- та масообміну. Одним із ключових напрямів підвищення енергоефективності виробництв є вдосконалення теплообмінного обладнання, зокрема дефлегматорів, які забезпечують конденсацію парів та часткове повернення рідини у колону. Особливо актуальною є модернізація апаратів у виробництвах, пов'язаних з переробкою ароматичних вуглеводнів, зокрема бензолу, який є базовою сировиною нафтохімії.

Бензол є найпростішим представником ароматичних вуглеводнів, що характеризується високою термодинамічною стабільністю, леткістю та значною реакційною здатністю в реакціях електрофільного заміщення. Це безбарвна, легкозаймиста рідина з характерним запахом, яка має важливе промислове значення, незважаючи на токсичність і канцерогенність.

Бензол широко використовується як основна сировина для синтезу багатьох хімічних продуктів. Основна частина його виробництва спрямована на отримання етилбензолу, кумолу, циклогексану та нітробензолу. Через ці проміжні продукти бензол використовується для виробництва пластмас, синтетичних волокон, смол, каучуків, барвників, лікарських препаратів, мийних засобів та пестицидів. Зокрема, кумольний процес дозволяє отримувати фенол і ацетон, які є стратегічно важливими продуктами хімічної промисловості.

Промислові методи отримання бензолу базуються переважно на процесах переробки нафтової сировини. Найбільш поширеними є каталітичний риформінг нафтових фракцій, гідродеалкілування толуолу, а також диспропорціювання ароматичних вуглеводнів. Ці процеси здійснюються за високих температур і тисків, що обумовлює необхідність використання ефективного теплообмінного обладнання для регулювання температурних режимів.

Важливу роль у таких технологічних процесах відіграють теплообмінники, які забезпечують передачу теплоти між потоками різних середовищ. Вони застосовуються для нагрівання, охолодження, випаровування та конденсації речовин, що дозволяє підтримувати оптимальні умови перебігу хімічних реакцій та розділення сумішей. Найбільш поширеним типом у хімічній та нафтохімічній промисловості є кожухотрубні теплообмінники, які відзначаються високою надійністю, здатністю працювати при високих тисках і температурах, а також універсальністю застосування [1].

Конструкція кожухотрубного теплообмінника включає корпус (кожух) та пучок труб, по яких рухаються робочі середовища. Завдяки використанню перегородок (бафлів) досягається турбулізація потоку, що підвищує коефіцієнт тепловіддачі та ефективність процесу. Такі апарати широко застосовуються як конденсатори, випарники, підігрівачі та дефлегматори у технологічних схемах хімічних виробництв.

У виробництві продуктів алкілування бензолу дефлегматори відіграють критичну роль у процесах ректифікації, забезпечуючи повернення частини конденсату у колону та підвищення ступеня розділення компонентів. Водночас існуючі конструкції часто мають обмежену ефективність через недостатню інтенсивність теплообміну, нерівномірний розподіл потоків або підвищені гідравлічні втрати [2].

У зв'язку з цим модернізація дефлегматора установки алкілування бензолу є актуальним інженерним завданням, спрямованим на підвищення енергоефективності, продуктивності та надійності роботи обладнання. Впровадження сучасних конструктивних рішень дозволяє інтенсифікувати теплообмінні процеси, зменшити енергетичні витрати та покращити техніко-економічні показники виробництва.

Метою дипломного проєкту є модернізація дефлегматора установки алкілування бензолу шляхом удосконалення його конструктивного виконання, проведення комплексу інженерних розрахунків та обґрунтування технічних

рішень, спрямованих на підвищення ефективності процесів конденсації й ректифікаційного розділення, зниження енергоспоживання, забезпечення надійної та безпечної експлуатації обладнання, а також покращення техніко-економічних показників виробництва.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- дослідити технологічну схему установки алкілування бензолу та визначити функціональне призначення дефлегматора в процесі розділення технологічних потоків;
- провести аналіз сучасних конструкцій дефлегматорів і теплообмінного обладнання, що застосовується в ректифікаційних та сепараційних процесах нафтохімічної промисловості;
- виконати патентно-інформаційний пошук та аналіз перспективних технічних рішень у сфері вдосконалення дефлегматорів;
- обґрунтувати вибір конструкції модернізованого дефлегматора з урахуванням особливостей технологічного процесу алкілування бензолу;
- здійснити теплотехнічний розрахунок апарата для визначення необхідної поверхні теплообміну та режимних параметрів роботи;
- провести параметричний розрахунок і встановити основні конструктивні характеристики обладнання;
- визначити раціональні геометричні параметри дефлегматора та його основних елементів;
- виконати гідравлічний розрахунок апарата та оцінити вплив модернізації на втрати тиску в системі;
- перевірити міцність і працездатність основних конструктивних елементів дефлегматора, зокрема корпуса, днищ, штуцерів, трубного пучка, трубної решітки та опорних вузлів;
- обґрунтувати вибір матеріалів конструкції з урахуванням температурного режиму, робочого тиску та фізико-хімічних властивостей робочих середовищ;

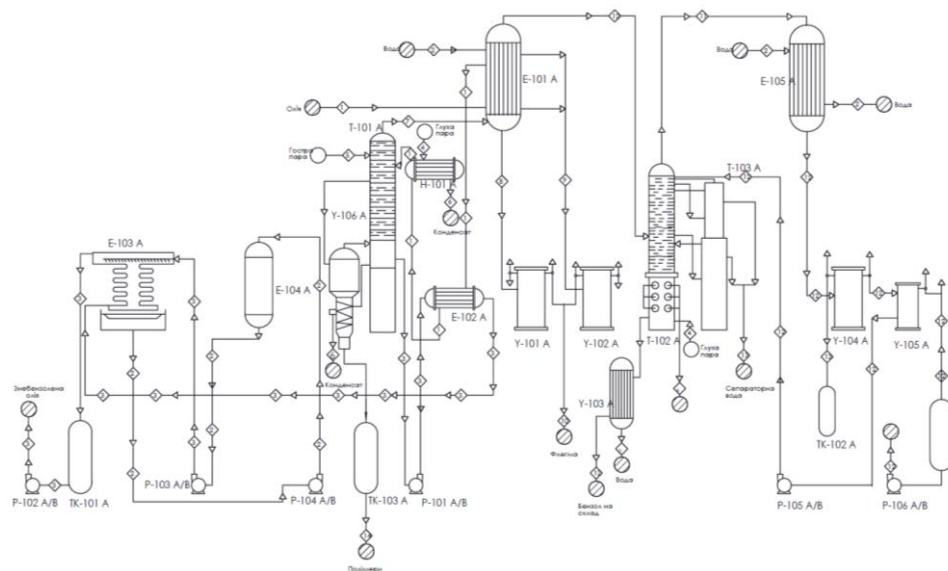
- розробити комплект конструкторської документації, що включає складальне креслення дефлегматора та креслення окремих вузлів і деталей;
- виконати креслення технологічної схеми установки алкілування бензолу та оформити необхідні специфікації;
- провести аналіз відповідності модернізованої конструкції вимогам нормативних документів з охорони праці, пожежної та промислової безпеки;
- розробити організаційно-технічні заходи щодо безпечного монтажу, експлуатації та ремонту дефлегматора;
- виконати техніко-економічну оцінку запропонованої модернізації та визначити очікуваний економічний ефект від її впровадження;
- підготувати рекомендації щодо експлуатаційного обслуговування обладнання, спрямовані на підвищення його надійності та збільшення міжремонтного ресурсу.

ЛН21.01.101.001 ПЗ	Інд. змін.	Дата видання	Мова UA	Аркуш 17
--------------------	------------	--------------	------------	-------------

1 Призначення та область застосування апарата

1.1 Опис технологічного процесу

На рисунку 1.1 наведена схема сирого бензолу при паровому нагріванні поглинаючого масла. Насичена бензольними вуглеводнями поглинальна олія після скрубберів подається в дефлегматор 1, в якому нагрівається від 25-30 до 75-80° С парами, що виходять з дистиляційної колони 2. Насичене масло надходить у трубний простір нижніх трубчаток. Верхня трубчатка дефлегматора охолоджується технічною водою.



1, 16 – дефлегматор; 2 – дистиляційна колона; 3 – теплообмінник; 4 – паровий нагрівач; 5, 8, 10, 11, - насос; 6 – зрошувальний охолоджувач; 7, 18, 23 – збірник; 9 – конденсатор; 12, 13, 17, 21 – сепаратор; 14 – розділова колона; 15 – холодильник; 22 – випарник; 24 – додаткова колона

Рисунок 1.1 – Схема сирого бензолу при паровом нагріві поглинаючого масла [3]

Після дефлегматора масло надходить у теплообмінники 3, де нагрівається знебензоленим маслом, що стікає з колони до температури 105-115°С і далі

підігрівається глухою парою в паровому підігрівачі 4 до температури 130-135°C.

З парового підігрівача масло надходить у дистиляційну колону 2, в якій за допомогою гострої пари, що подається в нижню частину, відганяються бензольні вуглеводні, а також частина поглинаючої олії та води.

З нижньої частини колони знебензолене масло відкачується насосом 5 у теплообмінник 3, де воно віддає частину свого тепла маслу, що надходить з дефлегматора. Після теплообмінника знебензолене масло має температуру 90-100°C.

Остаточне охолодження знебензованої олії здійснюється в зрошувальному холодильнику 6, після чого воно надходить у збірник 7 і далі насосом 8 подається на скрубери. Зрошувальний холодильник охолоджується водою, що подається після градирні 9 насосом 10, а нагріта вода відкачується насосом 11 на градирню.

Пари бензольних вуглеводнів, поглинального масла та води з дистиляційної колони 2 надходять у міжтрубний простір дефлегматора 1. У нижніх трьох трубчатках, як зазначено було вище, пари охолоджуються насиченим маслом, а у верхній трубчатці - технічною водою.

Флегми, що утворюються у дефлегматорі – важка і легка надходять у відповідні сепаратори 12 і 13. Після обох сепараторів флегму з'єднують і додають у цикл поглинального масла, а воду після додаткового се відстою від масла відводять у каналізацію фенольних вод.

Після дефлегматора пари сирого бензолу і пари води, що не сконденсувалися, направляються в розділову колону 14, в якій пари бензольних вуглеводнів поділяються на дві фракції сирого бензолу: легкий бензол, або бензол І, і важкий бензол, або бензол ІІ.

Розділова колона складається з двох частин: верхньої - ректифікаційної та нижньої - випарної.

Пари з дефлегматора 7 надходять в низ частини ректифікації колони і, проходячи знизу вгору, збагачуються низькокиплячими компонентами. При цьому верх колони в якості рефлюксу подається бензол І з конденсатора. Кількість рефлюксу він дистиляту - бензолу І зазвичай становить 2-4%.

Пари легкого бензолу і водяні пари з верхньої частини розділової колони надходять у конденсатор 16, конструкції аналогічний дефлегматору.

У конденсаторі відбувається конденсація та охолодження бензолу та води. Пари надходять у міжтрубний простір, проходячи зверху вниз послідовно трубчатки, а вода, що охолоджує, проходить по трубках від нижньої трубчатки до верхньої.

Бензол І і конденсат води з конденсатора надходять у сепаратор 17, звідки після відділення води бензол І направляється в бачок для рефлюксу 21.

Частина бензолу І з бачка 21 як рефлюкс подається насосом 20 на верхню тарілку частини ректифікації розділової колони 14, а частина надходить у збірник 18, звідки насосом 19 подається на склад.

Для виведення конденсату води, що утворюється вгорі колони, з її верхніх тарілок, відводиться бензол І і вода в сепаратор 24, і після відділення води бензол І повертається в колону. Зазвичай сепаратор 24 відводиться рідина з другої тарілки, а повертається з сепаратора на третю тарілку, вважаючи зверху. В результаті конденсації, що відбувається на тарілках ректифікаційної частини колони, конденсат, що утворюється, також містить воду

Тому бензольні вуглеводні та вода з нижньої тарілки цієї частини розділової колони виводяться в сепаратор 24, звідки після відокремлення від води бензольні вуглеводні повертаються на верхню тарілку нижньої - випарної частини розділової колони.

У випарній частині колони встановлені підігрівачі для підігріву важкого бензолу - бензолу ІІ глухою парою. З цієї частини колони бензол ІІ надходить до холодильника 15, звідки передається на склад.

Оскільки якість циркулюючого поглинального масла в процесі роботи погіршується внаслідок розчинення в ньому продуктів полімеризації, що утворюються, і при цьому збільшується в'язкість і молекулярна маса поглинача, то для збереження якості масла деяка його частина виводиться з циклу масла на регенерацію.

Регенерація поглинального масла здійснюється в паровому регенераторі 22. Для цього з однією з верхніх тарілок дистиляційної бензольної колони 2 частина поглинального масла в кількості близько 1-1,5% відводиться в регенератор, де воно нагрівається глухою парою до 160-165°C і промивається. Олія при цьому майже повністю випаровується і разом з водяними парами надходить у нижню частину дистиляційної колони.

Утворені при дії високої температури з ненасичених сполук, що містяться в олії, полімери, а також важкі погони масла випускаються через нижній спускний штуцер регенератора в збірник 23 для полімерів.

Кількість полімерів, що виводяться з регенератора, становить 10-40% від кількості масла, що направляється в регенератор [3].

1.2 Вибір типу підігрівача і його місце в технологічній схемі

У технологічних процесах переробки ароматичних вуглеводнів, зокрема при виділенні сирого бензолу, важливу роль відіграють процеси конденсації та часткового повернення рідкої фази у колону. Ці функції реалізуються за допомогою дефлегматорів – теплообмінних апаратів, призначених для часткової конденсації парів із наступним розділенням фаз та поверненням частини конденсату у технологічний цикл як флегми. Ефективність роботи дефлегматора безпосередньо впливає на ступінь розділення компонентів, енерговитрати процесу та стабільність роботи ректифікаційної колони.

У даній роботі обґрунтовано вибір вертикального кожухотрубного дефлегматора, який є найбільш доцільним для умов установки алкілування

бензолу та пов'язаних процесів ректифікації. Такий вибір пояснюється рядом конструктивних та експлуатаційних переваг. Вертикальна орієнтація апарата забезпечує ефективне відведення конденсату під дією сили тяжіння, покращує фазове розділення та зменшує ймовірність гідравлічних застійних зон. Крім того, вертикальні апарати займають меншу площу, що є важливим фактором при komponуванні технологічних установок.

Кожухотрубна конструкція дефлегматора є найбільш поширеною у хімічній та нафтохімічній промисловості завдяки своїй універсальності та надійності. Вона дозволяє працювати при високих температурах і тисках, характерних для процесів переробки бензолу та його похідних [4].

У сучасній практиці застосовуються різні типи дефлегматорів:

- кожухотрубні (вертикальні та горизонтальні);
- пластинчасті;
- змієвикові;
- апарати з оребреними трубами.

Проте для умов розглянутого виробництва найбільш доцільним є саме кожухотрубний вертикальний дефлегматор, оскільки пластинчасті апарати менш стійкі до високих температур і забруднень, а змієвикові не забезпечують необхідної продуктивності при великих витратах парів [5].

Дефлегматор займає проміжне положення між дистиляційною колоною та наступними апаратами розділення і виконує ключову роль у формуванні потоків флегми та парів, що визначають ефективність ректифікації. Його робота впливає на тепловий баланс установки, ступінь вилучення бензольних вуглеводнів та якість кінцевих продуктів [6].

2 Технічна характеристика підігрівача

Технічна характеристика теплообмінного апарату наведена у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Технічні характеристики

№	Параметри, розмірність	Значення
1	Продуктивність за парами бензолу, кг/с	3
2	Початкова температура парів бензолу, °C	85
3	Кінцева температура парів бензолу, °C	85
4	Початкова температура води, °C	20
5	Кінцева температура води, °C	65
6	Поверхня теплообміну, м ²	97
7	Кількість труб, штук	206
8	Зовнішній діаметр труб, м	0,025
9	Внутрішній діаметр труб, м	0,021
10	Довжина труб, м	6
11	Діаметр апарату, м	0,6
12	Габаритні розміри, мм:	
	- довжина	1168
	- висота	6674
	- ширина	1168

3 Опис та обґрунтування вибраної конструкції апаратів

3.1 Опис конструкції, основних складальних одиниць та деталей апарата

У теплообмінних апаратах із нерухомими трубними решітками (типу ТН) виникає специфічна проблема, пов'язана з різницею температур між трубним пучком і кожухом. Внаслідок цього відбувається нерівномірне теплове розширення елементів конструкції, що призводить до появи внутрішніх термічних напружень. Саме тому такі апарати доцільно застосовувати лише за умов відносно невеликого перепаду температур між теплоносіями.

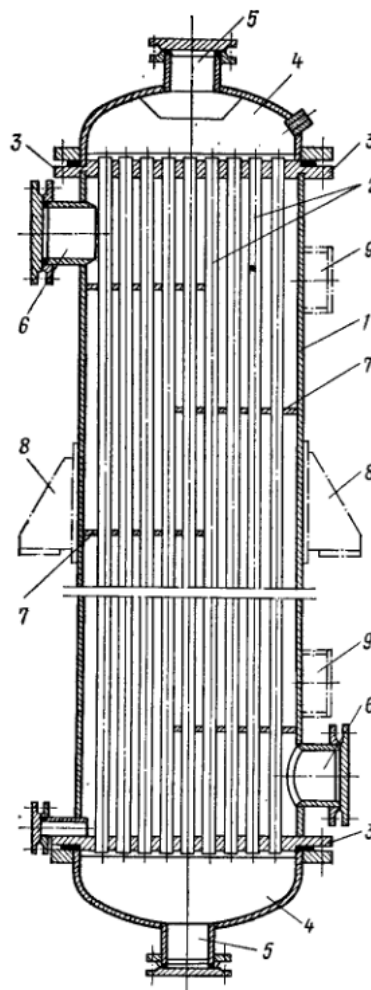
Для одноходових кожухотрубних теплообмінників характерною є невисока швидкість руху середовища всередині труб при малих витратах, що обмежує інтенсивність тепловіддачі. Підвищити ефективність теплообміну в такому випадку можна шляхом зменшення діаметра труб із одночасним збільшенням їх довжини, що сприяє зростанню швидкості потоку та коефіцієнтів тепловіддачі [5].

Вертикальний дефлегматор, який використовується для охолодження парів бензолу водою показано на рисунку 3.1, являє собою теплообмінний апарат, призначений для часткової конденсації парової фази з подальшим поверненням частини конденсату в колону у вигляді флегми. Такі апарати широко застосовуються у процесах ректифікації та розділення ароматичних вуглеводнів.

З конструктивної точки зору дефлегматор виконують у вигляді вертикального кожухотрубного теплообмінника. Пари бензолу надходять у міжтрубний простір і рухаються знизу вгору, тоді як охолоджувальна вода циркулює по трубах у протитечійному режимі. Така схема забезпечує ефективний відвід теплоти та часткову конденсацію парів. У результаті утворений конденсат стікає вниз і повертається у ректифікаційну колону,

покращуючи процес розділення, тоді як неконденсовані пари направляються на наступні стадії технологічного процесу.

Конструктивною особливістю апаратів із жорстким кріпленням є нерухоме з'єднання труб із трубними решітками, а решіток – із корпусом. Така схема виключає можливість взаємного переміщення елементів, тому подібні теплообмінники відносять до апаратів жорсткої конструкції. Основною перевагою цього типу є простота виконання та відносно невисока вартість виготовлення.



1 - корпус; 2 - труби; 3 - трубні ґрати; 4 - кришки; 5 - штуцери для входу та виходу з трубного простору; 6 - штуцери для входу та виходу з міжтрубного простору; 7 - поперечні перегородки міжтрубного простору; 8, 9 - опорні лапи відповідно при вертикальному та горизонтальному розташуваннях апарата

Рисунок 3.1 – Кожухотрубний теплообмінний апарат [5]

Водночас такі апарати мають певні обмеження. По-перше, очищення міжтрубного простору є ускладненим, що обмежує їх застосування середовищами, які не утворюють відкладень і не мають агресивних властивостей. По-друге, значна різниця температур між трубами і кожухом може спричиняти додаткові деформації труб, що призводить до втрати герметичності в місцях їх кріплення до трубних решіток. У результаті можливе змішування теплоносіїв. З огляду на це, подібні теплообмінники зазвичай експлуатують при різниці температур не більше 60 °С та за обмеженої довжини апарата [5].

Корпус дефлегматора, що використовується у процесах переробки бензолу, виготовляється з матеріалів, стійких до дії ароматичних вуглеводнів і води. Конструкція апарата розрахована на роботу при підвищених тисках і температурах, забезпечує рівномірний розподіл потоків і ефективну теплопередачу. Вертикальне виконання дозволяє зменшити займану площу та забезпечити самоплинне відведення конденсату, що є важливою перевагою для промислових установок [6].

3.2 Опис модернізації апарата

Процес алкілування бензолу вимагає високої точності підтримки температурного режиму в дефлегматорі, оскільки ефективність відділення алкілбензолів безпосередньо залежить від рівномірності конденсації та контролю фракційного складу. Традиційні кожухотрубні теплообмінники (дефлегматори), що використовуються на промислових установках, мають обмежену ефективність теплопередачі через нерівномірність розподілу паро- та теплоносіїв, локальні застої та недостатню площу контактної поверхні.

Одним із перспективних напрямків модернізації дефлегматора є використання мікроребер на внутрішній поверхні теплообмінних труб (рисунки 3.2). Така конструктивна зміна дозволяє суттєво підвищити ефективність

процесу теплообміну без істотного збільшення габаритів апарата або витрат енергії [7].

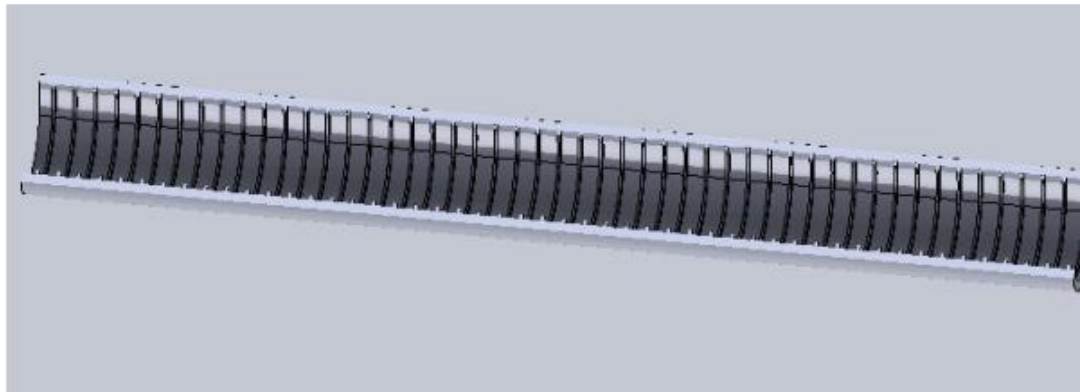


Рисунок 3.2 – Зображення мікроребер на внутрішній поверхні теплообмінних труб

Ідея полягає у створенні на внутрішній поверхні труб невеликих спіральних або поздовжніх виступів, які формують легку турбулентність потоку охолоджувального середовища. Турбулентний рух сприяє швидшій передачі тепла від стінки труби до потоку охолоджуючої рідини, зменшуючи товщину теплового пограничного шару та підвищуючи коефіцієнт теплопередачі. У дефлегматорах для алкілування бензолу це дозволяє більш ефективно відводити теплоту від конденсованих парів алкілбензолу, стабілізувати температурний режим та забезпечити рівномірну конденсацію по всій довжині апарата [7].

Методи реалізації внутрішніх мікроребер у трубах дефлегматора

1) Механічне профілювання внутрішньої поверхні труб – включає гвинтове або спіральне проточування металу, холодне деформування або обробку металевими роликами для формування поздовжніх або спіральних виступів. Цей метод забезпечує точне визначення висоти та кроку ребер для оптимальної інтенсифікації теплообміну [7, 8].

2) Лиття або екструзія труб із інтегрованою мікроструктурою – труби виготовляються з ребристою внутрішньою поверхнею відразу при формуванні металу або композитного матеріалу. Це дозволяє отримати високоточні профілі ребер та уникнути додаткової механічної обробки.

3) Використання вставних ребристих елементів – у гладкі труби інтегруються внутрішні вставки з поздовжніми або спіральними канавками. Такий метод забезпечує легку модифікацію існуючих труб без їх повної заміни і дозволяє експериментально підбирати оптимальний профіль для конкретного потоку [8].

Кожен із цих методів реалізує контрольовану турбулентність потоку і підвищує коефіцієнт теплопередачі, водночас зберігаючи допустимі гідравлічні втрати. Поєднання внутрішніх мікроребер із зовнішнім оребренням труб та оптимізацією компонування пучка труб забезпечує комплексну інтенсифікацію теплообміну, що підвищує ефективність роботи дефлегматора.

Переваги застосування внутрішніх мікроребер включають:

- підвищення коефіцієнта теплопередачі на 10–25 % залежно від геометрії ребер і швидкості потоку;
- зменшення локальних зон перегріву та застою охолоджуючої рідини;
- можливість використання труб меншого діаметра при збереженні теплової потужності апарата;
- підвищення енергоефективності установки та зниження витрат охолоджуючого середовища.

Серед недоліків слід зазначити:

- ускладнення виготовлення труб та збільшення вартості теплообмінного пучка;
- необхідність ретельного розрахунку гідравлічного опору для уникнення надмірного підвищення втрат тиску;
- можливі складності при механічному очищенні внутрішніх каналів труб [9].

3.3 Вибір матеріалів

У процесах переробки бензолу дефлегматор працює в умовах підвищених температур (до 130–140 °С) та контакту з органічними сполуками, які можуть проявляти корозійну активність. Тому матеріали повинні мати достатню механічну міцність, корозійну стійкість та стабільність властивостей у заданому температурному інтервалі. Тому правильний вибір матеріалу є визначальним фактором ефективності та довговічності теплообмінника, оскільки саме матеріал впливає на процеси теплопередачі, корозії та зношування.

Для виготовлення кожуха дефлегматора доцільно використовувати вуглецеві або низьколеговані сталі (наприклад, 09Г2С або 16ГС), які характеризуються достатньою міцністю, хорошою зварюваністю та доступною вартістю. Такі матеріали широко застосовуються у хімічному машинобудуванні для виготовлення корпусних елементів теплообмінників, що працюють під тиском [10].

Трубний пучок, який є основною теплообмінною поверхнею, потребує більш високих вимог до матеріалу. Зокрема, необхідно забезпечити високу теплопровідність і стійкість до корозії. Для цих цілей застосовують нержавіючі сталі (типу AISI 304, AISI 316) або мідні та мідно-нікелеві сплави. Нержавіючі сталі мають високу корозійну стійкість і зберігають механічні властивості при підвищених температурах, що робить їх ефективними для використання у хімічній та нафтохімічній промисловості [11].

Для трубних решіток та перегородок (бафлів) зазвичай використовують сталі, сумісні за властивостями з матеріалом труб, що дозволяє уникнути електрохімічної корозії та забезпечити герметичність з'єднань. Відомо, що узгодженість матеріалів усіх елементів конструкції є важливим фактором запобігання руйнуванню апарата під час тривалої експлуатації.

Прокладкові матеріали та ущільнення повинні бути стійкими до дії органічних розчинників і температури. Для цього застосовують пароніт, фторопласт або інші полімерні матеріали з високою хімічною стійкістю [12].

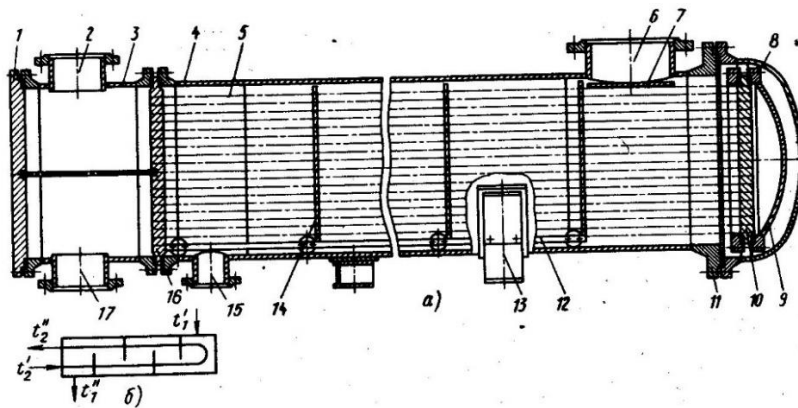
Основні фізико-механічні властивості матеріалів, що використовуються у теплообмінниках, включають межу міцності, теплопровідність, корозійну стійкість та пластичність. Наприклад, нержавіючі сталі мають межу міцності на розтяг близько 500–700 МПа та теплопровідність у межах 14–17 Вт/(м·К), тоді як мідь має значно вищу теплопровідність – понад 380 Вт/(м·К), що суттєво підвищує ефективність теплообміну [13].

3.4 Порівняння основних показників розробленої конструкції підігрівача з аналогами

Теплообмінник з плаваючою голівкою

Будова та принцип дії. У конструкції кожухотрубних теплообмінників компенсація температурних деформацій може здійснюватися не лише за рахунок встановлення компенсаторів на кожусі, але й шляхом їх розміщення у вузлі плаваючої головки (рисунк 3.3), зокрема на її вихідному патрубку. Такі компенсувальні елементи працюють за аналогічним принципом, як і компенсатори типу «К», однак у даному випадку вони сприймають деформації не корпусу апарата, а трубного пучка.

Компенсатори цього типу зазвичай мають менші геометричні розміри та товщину стінок, а для підвищення ефективності компенсації встановлюються послідовно декількома елементами. Під час експлуатації при підвищенні температури трубний пучок подовжується, і плаваюча головка має можливість вільно переміщуватися всередині кожуха. Така «плаваюча» схема дозволяє уникнути виникнення значних термічних напружень і забезпечує надійну роботу апарата при змінних температурних режимах.



1 – фланцева кришка; 2, 17 – штуцера для введення та виведення теплоносія, що подається у трубний простір; 3 – розподільна камера; 4 – кожух; 5 – трубний пучок; 6, 15 – штуцера для введення та виведення теплоносія, що подається в міжтрубний простір; 7 – відбійник; 8 – кришка; 9 – кришка «плаваючої головки»; 10 - рухомі трубні ґрати; 11 – фланці; 12 – роликова опорна платформа; 13 - сідлоподібна опора; 14 – сегментна перегородка; 16 - нерухомі трубні ґрати

Рисунок 3.3 – Теплообмінник з плаваючою голівкою [14]

Переваги теплообмінника з плаваючою голівкою:

- 1) Забезпечується ефективна компенсація температурних деформацій трубного пучка, що дозволяє експлуатувати апарат при значних перепадах температур;
- 2) Напівжорстка конструкція сприяє підвищенню надійності та довговічності роботи теплообмінника;
- 3) Можливе зручне осьове підключення трубопроводів подачі та відведення теплоносіїв;
- 4) Зменшується ризик виникнення напружень у зонах кріплення труб, що підвищує герметичність апарата.

Недоліки теплообмінника з плаваючою голівкою:

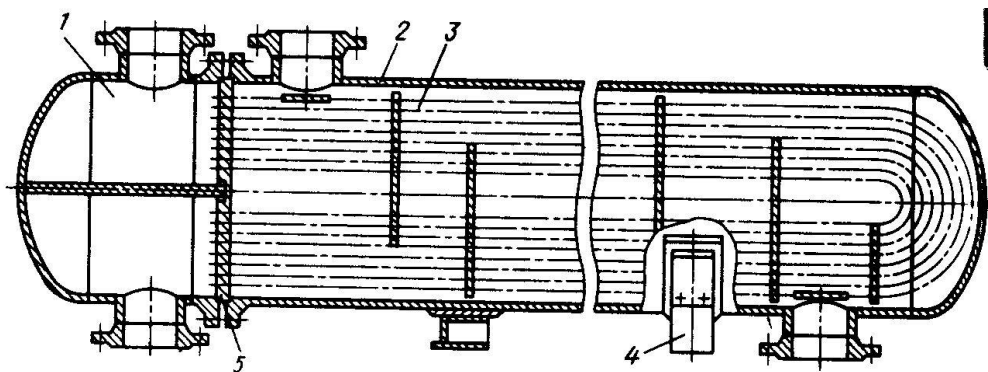
- 1) Конструкція є більш складною у виготовленні та монтажі порівняно з апаратами жорсткого типу;

2) Збільшуються витрати на виробництво через додаткові елементи (компенсатори, рухомі вузли);

3) Наявність зварних з'єднань і зменшена товщина стінок компенсаторів потребують більш ретельного контролю якості виготовлення [14, 15].

Теплообмінник з U-подібними трубами

Будова та принцип дії. Теплообмінний апарат з U-подібними трубами (рисунок 3.4) має конструкцію, що включає кожух і трубний пучок з U-подібними трубами, закріпленими в одній трубній решітці. Трубна решітка разом із розподільною камерою 4 приєднується до корпусу апарата за допомогою фланцевого з'єднання.



1 - розподільна камера; 2 - кожух; 3 - U- подібні труби; 4 - сідлоподібна опора; 5 - трубна решітка

Рисунок 3.4 – Горизонтальний двоходовий теплообмінник з U-подібними трубами [15]

Недоліки теплообмінника з U-подібними трубами:

1. очищення внутрішньої поверхні труб, у зв'язку з чим їх застосування доцільне переважно для роботи з чистими середовищами, які не утворюють відкладень [15].

Переваги теплообмінника з U-подібними трубами:

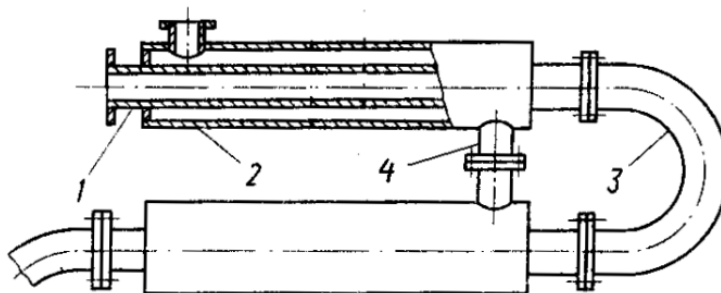
2. Можливість компенсації температурних деформацій завдяки вільному переміщенню U-подібного трубного пучка, що дозволяє ефективно працювати при значних перепадах температур між теплоносіями;

3. Відсутність задньої камери, що зменшує ймовірність протікань порівняно з конструкціями з плаваючою головкою;
4. Можливість демонтажу трубного пучка для проведення очищення або заміни;
5. Нижча вартість виготовлення у порівнянні з більш складними конструкціями, зокрема апаратами з плаваючою головкою.

Двотрубні теплообмінники

Будова та принцип роботи. Двотрубні теплообмінники застосовуються, як правило, при невеликих теплових навантаженнях, коли необхідна площа теплообміну не перевищує 30 м². Такі апарати часто називають теплообмінниками типу «труба в трубі». Вони являють собою систему послідовно з'єднаних елементів, кожен із яких складається з двох концентрично розташованих труб (рисунок 3.5).

Один теплоносій (І) рухається по внутрішній трубі 1, тоді як другий теплоносій (ІІ) протікає у кільцевому просторі між внутрішньою та зовнішньою трубами 2. Внутрішні труби з'єднуються між собою за допомогою колін (калачів) 3, а зовнішні — за допомогою з'єднувальних патрубків 4 [16].



1 – внутрішня труба, 2 – зовнішня труба; 3 – з'єднувальне коліно; 4 – з'єднувальний патрубок [11]

Рисунок 3.5 – Нерозбірний одноходовий теплообмінник типу «труба в трубі»

Переваги двотрубних теплообмінників:

ЛН21.01.101.001 ПЗ	Інд. змін.	Дата видання	Мова UA	Аркуш 33
--------------------	------------	--------------	------------	-------------

1. Високі коефіцієнти тепловіддачі завдяки значним швидкостям руху теплоносіїв.

2. Можливість ефективної роботи при невеликих витратах робочих середовищ.

3. Здатність працювати при високих тисках.

Недоліки двотрубних теплообмінників:

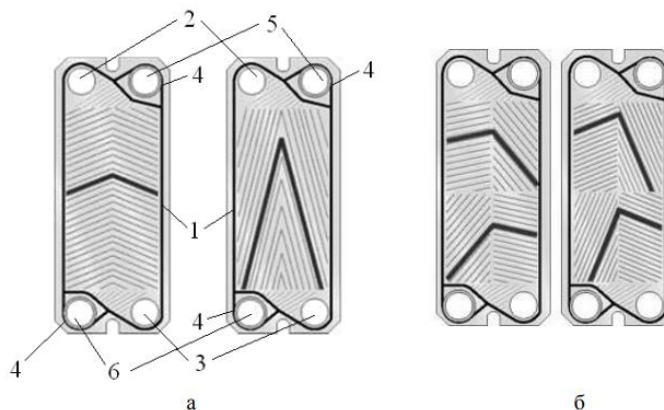
1. Відносно невелика площа теплообміну при значних габаритах апарата.

2. Підвищені витрати матеріалу на виготовлення.

3. У нерозбірних конструкціях ускладнене очищення та технічне обслуговування [17].

Пластинчасті теплообмінники

Будова та принцип роботи. Пластинчасті теплообмінники належать до підкласу теплообмінних апаратів із плоскою поверхнею теплопередачі, яка формується гофрованими паралельними пластинами (рисунок 3.6). Пластини повернуті одна відносно одної на 180° , зібрані у пакет і закріплені в рамі.



а – стандартні (симетричні) пластины; б – пластины з рисунком типу «асиметрична ялинка»; 1 – прокладка, що обмежує простір першого теплоносія; 2, 3 – отвори для входу та виходу першого теплоносія; 4 – прокладка, що обмежує простір другого теплоносія; 5, 6 – отвори для проходу другого теплоносія

Рисунок 3.6 – Гофровані пластины пластинчастих теплообмінників [18]

Таке компонування пластин забезпечує чергування гарячих і холодних каналів. У процесі теплообміну рідини рухаються назустріч одна одній, тобто реалізується протитечійний режим, що сприяє підвищенню ефективності теплопередачі. Подвійні гумові ущільнення практично виключають змішування теплоносіїв і втрати робочих середовищ.

Переваги пластинчастих теплообмінників:

1. Пластинчасті теплообмінники відзначаються компактністю — їхні габаритні розміри у 4–8 разів менші порівняно з кожухотрубними теплообмінниками за однакової площі поверхні теплопередачі.

2. Вони забезпечують високі коефіцієнти теплопередачі (3000–4000 Вт/(м²·К)), що більш ніж утричі перевищує аналогічні показники кожухотрубних апаратів. Це досягається за рахунок високої швидкості руху теплоносіїв у каналах (1–3 м/с) при відносно невеликих гідравлічних втратах.

3. Розбірні пластинчасті теплообмінники є зручними в обслуговуванні, очищенні та проведенні ремонтних робіт.

4. Існує можливість варіювання схем компонування пластин, що дозволяє підібрати оптимальний режим роботи відповідно до заданих витрат теплоносіїв.

Недоліки пластинчастих теплообмінників:

1. Обмеження щодо роботи при високих тисках: розбірні пластинчасті теплообмінники мають недостатню герметичність прокладок і зазвичай працюють при тиску до 1 МПа, тоді як зварні — до 4 МПа, але при цьому існує ризик деформації пластин.

2. Для зварних пластинчастих теплообмінників характерні ускладнення в обслуговуванні, оскільки їх очищення та ремонт є складними [18, 19].

У таблиці 3.1 наведено порівняльну характеристику основних техніко-експлуатаційних показників кожухотрубних теплообмінних апаратів різних конструктивних виконань, а також дефлегматора, що проектується.

Таблиця 3.1– Порівняння основних показників дефлегматора з аналогами

Показник	Тепло-обмінник з нерухомою решіткою [15]	Тепло-обмінник з компенсатором на кожусі [16]	Тепло-обмінник з U-подібними трубками [17]	Тепло-обмінник з плаваючою головкою [18]	Дефлегматор, що проектується
Теплове навантаження, кВт	800 (3)	950 (4)	1100 (5)	1200 (5)	1250 (5)
Коеф. теплопередачі, Вт/(м²·К)	250 (2)	280 (3)	320 (4)	350 (4)	380 (5)
Робочий тиск, МПа	1,6 (3)	2,5 (4)	3,0 (4)	4,0 (5)	4,0 (5)
Робоча температура, °С	200 (3)	250 (4)	300 (5)	350 (5)	350 (5)
Допустима ΔT , °С	50 (1)	100 (3)	150 (5)	200 (5)	200 (5)
Швидкість теплоносія, м/с	0,5 (2)	0,7 (3)	1,0 (4)	1,2 (4)	1,5 (5)
Площа теплообміну, м²	50 (3)	60 (3)	70 (4)	80 (4)	90 (5)
Гідравлічний опір, кПа	25 (4)	30 (3)	40 (2)	45 (2)	35 (3)
ККД теплообміну, %	65 (2)	70 (3)	80 (4)	85 (4)	90 (5)
Термін служби, років	10 (2)	12 (3)	15 (4)	18 (5)	20 (5)
Металоємність, кг	4500 (5)	5200 (4)	6000 (3)	7000 (2)	6500 (3)
Σ	30	37	44	45	51

Проведений порівняльний аналіз показав, що різні конструктивні типи теплообмінників мають свої переваги та обмеження. розроблений дефлегматор

перевищує розглянуті аналоги за сукупністю технічних показників, зокрема за коефіцієнтом теплопередачі, ефективністю теплообміну та експлуатаційною надійністю. Це досягається завдяки оптимізації конструкції, покращенню гідродинаміки потоків та ефективній організації теплообмінних процесів.

Запропонована конструкція дефлегматора є технічно обґрунтованою та доцільною для впровадження в установці алкілування бензолу, оскільки забезпечує підвищення енергоефективності, надійності та загальної ефективності технологічного процесу.

3.5 Патентне дослідження

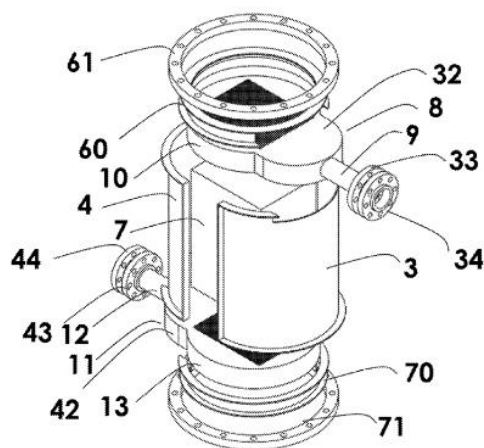
У патенті [20] показано апарат з мікроканальним теплообмінником. Апарат складається з трьох основних частин, з'єднаних між собою (рисунки 3.7): мікроканальний теплообмінник: Утворений двома типами прямокутних пластин, які щільно складені в стопку в одній орієнтації, чергуючись між собою.

Пластина з плоскою поверхнею: Плоска пластина з піднятими краями. Слугує для утворення відкритого каналу.

Мікроканальна теплообмінна пластина: Пластина, на верхній поверхні якої є мікронні гофри (прямі, хвиляподібні або зигзагоподібні). Нижня поверхня пласка.

При з'єднанні: верх гофрованої пластини з низом плоскої пластини утворює закриті мікроканали для рідини. Низ гофрованої пластини з верхом наступної плоскої пластини утворює відкриті канали для газу.

Верхній пристрій введення/виведення рідини: Розташований зверху теплообмінника. Має верхню вхідну трубу, верхню сполучну камеру та систему напрямних каналів (для рідини, для газу), які точно співпадають з мікроканалами та відкритими каналами.



2 – конічний патрубок, 3 – напівциліндрична кришка, 4 – напівциліндрична кришка, 6 – конічний патрубок, 7 – мікроканальний теплообмінник, 8 – верхній пристрій введення/виведення рідини, 9 – верхня вхідна труба, 10 – верхня сполучна камера, 11 – нижній пристрій введення/виведення рідини, 12 – нижня вхідна труба, 13 – нижня сполучна камера, 30 – напрямні канали для рідини, 31 – напрямні канали для газу, 40 – нижні напрямні канали, 41 – нижні напрямні канали для газу, 61 – фланець, 71 – фланець, 100 – пластина з плоскою поверхнею, 110 – відкритий канал, 200 – мікроканальна теплообмінна пластина, 210 – закритий мікроканал

Рисунок 3.7 – Будова апарату [20]

Нижній пристрій введення/виведення рідини: Розташований знизу, симетричний до верхнього. Має нижню вхідну трубу, нижню сполучну камеру та аналогічні напрямні канали. Периферія теплообмінника закрита двома напівциліндричними кришками. Для під'єднання до газових магістралей використовуються конічні патрубки та фланці.

Модернізація Головне нововведення полягає у створенні гібридної структури каналів всередині одного апарату. Винахід поєднує в собі два типи каналів шляхом почергового складання різних пластин:

Закриті мікроканали для рідини або чистого газу (збільшують площу теплопередачі).

Відкриті канали для забрудненого газу (запобігають забиванню). Це вирішує проблему використання мікроканальних теплообмінників із газами, що містять тверді частинки (сажа, пил), де звичайні мікроканали швидко забиваються, створюючи високий перепад тиску.

Переваги:

- Стійкість до забруднень: Відкриті канали дозволяють пропускати запилені гази (наприклад, димові гази) без ризику забивання, що робить апарат придатним для промислових вихлопів.
- Висока ефективність теплообміну: Використання мікроканалів для чистого теплоносія забезпечує велику площу контакту та високу інтенсивність теплопередачі.
- Компактність: Поєднання обох функцій в одному апараті дозволяє зменшити габарити установки порівняно з використанням окремих теплообмінників.
- Універсальність: Може працювати в різних орієнтаціях (вертикально, горизонтально, похило) та з різними типами рідин і газів.
- Низький перепад тиску для газу: Завдяки великим відкритим каналам опір проходженню газу значно менший, ніж у випадку, якщо б газ пропускали через мікроканали.

Недоліки:

- Складність виготовлення: Точне виготовлення мікронних гофр на пластинах та їхнє герметичне з'єднання (особливо різнорідних пластин) є технологічно складним завданням, що вимагає прецизійного обладнання.
- Вартість: Висока точність виготовлення та використання спеціальних матеріалів призводять до високої собівартості апарату.
- Обслуговування: У разі забруднення або забивання відкритих каналів дуже великими частинками, очищення внутрішньої структури буде вкрай складним через нерозбірність пакету пластин.

– Обмеження по тиску: Тонкостінні пластини з мікроканалами можуть мати обмеження за максимальним робочим тиском порівняно з товстостінними трубчастими теплообмінниками [14].

У патенті [21], описується теплообмінник для частинок та адсорбер з температурним гойданням на його основі (рисунок 3.8).

Апарат складається з вертикальної циліндричної посудини, заповненої гранулами сорбенту. Всередині шару гранул розташована теплообмінна структура. Вона включає вхідний та вихідний колектори, розташовані в нижній частині. Між колекторами підключено безліч змієподібних трубок. Кожна трубка має кілька вертикальних паралельних секцій, з'єднаних послідовно зігнутими секціями. Відстань між вертикальними секціями становить 2-10 діаметрів гранул сорбенту. Зверху та знизу посудина має газові входи/виходи з дифузорами. Знизу шар гранул підтримується опорною пластиною.

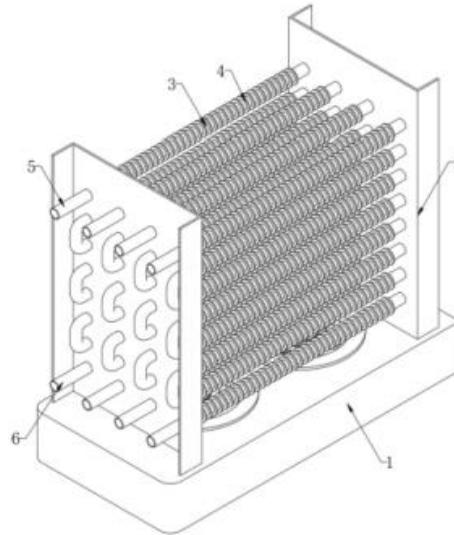
Модернізація:

Заміна традиційних способів нагріву (грійуча сорочка, занурені спіралі або вертикальні труби великого діаметру) на систему вертикальних змієподібних трубок малого діаметру, які рівномірно пронизують весь об'єм сорбенту. Для компенсації нерівномірності нагріву пропонується використовувати дві переплетені секції трубок з протилежними напрямками потоку теплоносія.

Переваги:

- Висока ефективність теплопередачі завдяки щільному контакту гранул з трубками по всій висоті апарату.
- Рівномірний розподіл температури в об'ємі сорбенту (завдяки переплетеним секціям).
- Компактність конструкції, що дозволяє створювати апарати для встановлення на транспортні засоби.
- Можливість отримувати десорбований газ (CO_2) високої чистоти, оскільки теплоносії не контактує з газом.

Апарат (рисунок 3.9) складається з вентилятора (1) та розташованих над ним горизонтальних охолоджувальних труб (3) з ребрами (4). Труби з'єднані послідовно за допомогою поворотних з'єднань і мають можливість обертатися від приводу з черв'ячною передачею. Знизу встановлені повітряні дефлектори.



1 – вентилятор, 2 – труби, 4 – ребра, 5, 6 - привод

Рисунок 3.9 – Будова охолоджувача з ребристими трубами [22]

Модернізація:

Винахід пропонує заміну традиційних водяних холодильників (які страждають від накипу при високих температурах) на повітряний охолоджувач з обертовими трубами. Обертання труб забезпечує рівномірніше охолодження по всьому периметру та інтенсифікує теплообмін.

Переваги:

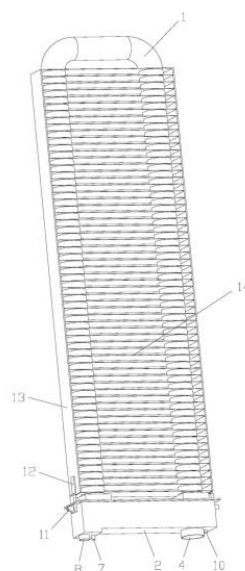
- Повне усунення проблеми накипу, характерної для водяного охолодження.
- Висока безпека (відсутній ризик змішування технологічного середовища з водою).
- Підвищена ефективність завдяки обертанню труб та дефлекторам.

Недоліки:

ЛН21.01.101.001 ПЗ	Інд. змін.	Дата видання	Мова UA	Аркуш 42
--------------------	------------	--------------	------------	-------------

- Додаткові витрати енергії на роботу вентилятора та приводу обертання.
- Залежність ефективності від температури навколишнього повітря.
- Складніша механічна конструкція з рухомими частинами, що потребує обслуговування.
- Більші габарити порівняно з компактними кожухотрубними апаратами [22].

У винаході [23] А описано вертикальний кожухотрубний дефлегматор (рисунок 3.10) для розділення багатоконпонентних сумішей. Апарат має вертикальний пучок труб, який розділений на кілька окремих секцій (зон). У різних секціях використано труби різного діаметру та/або довжини. Це створює різні умови для конденсації по висоті апарату.



1 – нагрівальна труба, 2 – ізоляційна оболонка, 4 – вихід димових газів,
7 – вхід горючого газу, 8 – вхід повітря, 10 – запалювач, 11 – ізоляційна
втулка, 12 – електрод, 13 – нагрівальна пластина, 14 - ребра

Рисунок 3.10 – Будова теплообмінника [23]

Модернізація: інновація полягає у впровадженні принципу фракціонування всередині одного апарату. Замість того, щоб просто конденсувати пару, дефлегматор виконує часткове розділення суміші:

ЛН21.01.101.001 ПЗ	Інд. змін.	Дата видання	Мова UA	Аркуш 43
--------------------	------------	--------------	------------	-------------

висококиплячі компоненти конденсуються в секції з меншими трубами (інтенсивніше охолодження), а низькокиплячі проходять далі і конденсуються у верхніх секціях з більшими трубами.

Переваги:

- Підвищення чіткості розділення фракцій без використання додаткових колон.
- Компактність установки (один апарат виконує кілька функцій).
- Потенційна економія енергії на проміжне нагрівання/охолодження.

Недоліки:

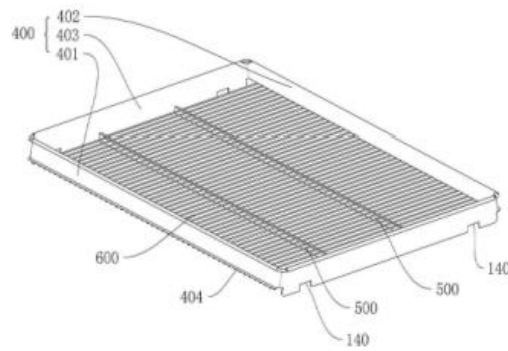
- Значно складніший тепловий та гідравлічний розрахунок.
- Складність виготовлення та з'єднання труб різного розміру в одних трубних решітках.
- Висока вартість [23].

У патенті [24] описано енергоефективний дефлегматор з утилізацією тепла.

Апарат має подвійні стінки: основний корпус (кожух) дефлегматора 400 оточений додатковою зовнішньою сорочкою (другим кожухом, рисунок 3.11). У простір між корпусами подається холодна вода або інша технологічна рідина.

Модернізація:

Модернізація перетворює пасивну теплоізоляцію на активний рекуператор тепла. Тепло, яке зазвичай втрачається через стінки апарату в навколишнє середовище, використовується для попереднього підігріву технологічної рідини в зовнішній сорочці.



140 – нагрівальний вузол, 400 – ізоляційний корпус теплообмінника,
 401 – канал теплообміну для горючого газу, 402 – канал теплообміну для
 повітря, 403 – вхід подачі горючого газу, 404 – вхід подачі повітря, 500 –
 ежектор, 600 – запалювач

Рисунок 3.11 – Схема дефлегматора [24]

Переваги:

- Зменшення теплових втрат та економія енергії.
- Попередній підігрів рідин без додаткових енерговитрат.
- Зниження температури в приміщенні (покращення умов праці).

Недоліки:

- Збільшення габаритів та маси апарату.
- Ускладнення обв'язки додатковими трубопроводами.
- Ускладнення доступу до основного корпусу для обслуговування [24].

Проведений патентний аналіз свідчить про актуальність пошуку нових конструктивних рішень, які забезпечували б високу теплотехнічну ефективність за одночасного збереження технологічної простоти, надійності та економічної доцільності. Отримані результати можуть бути використані як основа для вибору напрямку подальшої модернізації та розроблення удосконаленого теплообмінного обладнання.

4 Охорона праці

Установка алкілування бензолу належить до категорії хімічних виробництв підвищеної небезпеки, оскільки в процесі використовуються легкозаймисті, токсичні та корозійно-активні речовини, а також здійснюються процеси при підвищених температурах і тисках.

Дефлегматор є ключовим елементом ректифікаційної системи установки. Його основна функція полягає у частковій конденсації парової фази з поверненням флегми у колону, що забезпечує підвищення ступеня розділення компонентів реакційної суміші.

Бензол є речовиною 1 класу небезпеки (токсична, канцерогенна дія), що обумовлює підвищені вимоги до герметичності обладнання, вентиляції та контролю повітря робочої зони.

Небезпечні та шкідливі виробничі фактори при експлуатації дефлегматора

Під час роботи дефлегматора основними небезпечними факторами є хімічні, фізичні та аварійні впливи. До хімічних факторів відносяться пари бензолу та інших ароматичних вуглеводнів, які характеризуються високою токсичністю та здатністю утворювати вибухонебезпечні суміші з повітрям. Фізичні фактори включають підвищену температуру поверхонь обладнання, шум від насосного обладнання та вібрації трубопроводів. Аварійні ситуації можуть бути пов'язані з розгерметизацією системи, витоками продукту та утворенням вибухонебезпечних концентрацій парів.

Особливу увагу слід приділяти контролю концентрації бензолу у повітрі робочої зони, оскільки його гранично допустима концентрація відповідно до ГН 3.3.5-8.6.6.1 становить 5 мг/м³. Перевищення цього рівня є неприпустимим.

Мікроклімат виробничих приміщень

Мікроклімат у зоні обслуговування дефлегматора має відповідати вимогам ДСН 3.3.6.042-99 [25], наведені норми у таблиці 4.1, які регламентують

температуру, вологість і швидкість руху повітря залежно від категорії робіт. Обслуговування дефлегматора відноситься до робіт середньої важкості категорії Па–Пб.

Порушення мікрокліматичних умов може призводити до зниження працездатності персоналу, перегріву організму або переохолодження, а також до підвищення ризику аварій через втрату концентрації працівників.

Таблиця 4.1 – Норми мікроклімату згідно ДСН 3.3.6.042-99 [25]

Параметр	Холодний період	Теплий період
Температура повітря, °С	18–21	21–24
Відносна вологість, %	40–60	40–60
Швидкість руху повітря, м/с	≤0,2	≤0,3

Для забезпечення нормативних умов передбачено використання припливно-витяжної вентиляції з кратністю повітрообміну 10–12, а також локальних відсмоктувачів у місцях потенційного виділення парів бензолу.

Освітлення виробничих приміщень

Освітлення виробничих зон регламентується ДБН В.2.5-28:2018 [26], наведені норми у таблиці 4.2, який встановлює мінімальні рівні освітленості для різних типів робіт. Для обслуговування технологічного обладнання, включаючи дефлегматор, необхідне комбіноване освітлення – природне та штучне, з використанням вибухозахищених світильників.

Недостатній рівень освітлення може призвести до помилок при експлуатації обладнання, а надмірний – до зорового перевантаження персоналу.

Таблиця 4.2 – Норми освітлення [26]

Робоча зона	Освітленість, лк
Огляд обладнання	200–300
Контрольно-вимірювальні прилади	300–500
Аварійне освітлення	не менше 50

Для підвищення безпеки передбачається застосування автономного аварійного освітлення та регулярний контроль справності світильників.

Шум та вібрація

Джерелами шуму на установці є насосне обладнання, компресори та рух рідинно-парових потоків у трубопроводах. Постійний вплив шуму може викликати втрату слуху, підвищену втоми та зниження концентрації уваги. Вібрація, у свою чергу, впливає на опорно-руховий апарат і може спричиняти професійні захворювання.

Відповідно до ДСН 3.3.6.037-99 [27] допустимий рівень шуму на робочих місцях не повинен перевищувати 80 дБА. Нормування вібрації регламентується ДСН 3.3.6.039-99 [28]. Допустимі рівні шуму та вібрації наведені у таблиці 4.3.

Таблиця 4.3 – Допустимі рівні шуму та вібрації

Фактор	Допустимий рівень
Шум	80 дБА
Загальна вібрація	0,1–0,2 м/с ²
Локальна вібрація	до 4 м/с ²

Для зниження впливу шуму та вібрації застосовуються демпфуючі опори, балансування обертових механізмів, гнучкі вставки в трубопроводах та шумопоглинаючі екрани.

Пожежна та вибухова безпека

Виробництво алкілбензолів відноситься до категорії А за вибухопожежною небезпекою відповідно до НПАОП 40.1-1.32-01 [29]. Основною небезпекою є утворення парів бензолу, які у суміші з повітрям утворюють вибухонебезпечні концентрації.

Нижня концентраційна межа вибуховості бензолу становить близько 1,2% об'ємних. Додаткову небезпеку становлять нагріті поверхні обладнання та можливі електростатичні розряди. Засоби пожежної безпеки наведені у таблиці 4.4.

Таблиця 4.4 – Засоби пожежної безпеки

Засіб	Призначення
Газоаналізатори LEL	Контроль вибухонебезпечних концентрацій
Система CO ₂ або азотного гасіння	Локалізація пожеж
Порошкові вогнегасники	Первинне гасіння
Заземлення обладнання	Усунення статичної електрики
Ех-обладнання	Виключення іскроутворення

Пожежна та вибухова безпека і застосування вогнегасників

Виробниче середовище установки алкілування бензолу відноситься до категорії А за вибухопожежною небезпекою відповідно до НПАОП 40.1-1.32-01 [30]. Основною причиною потенційних пожеж і вибухів є утворення парів бензолу та інших вуглеводнів, які у суміші з повітрям утворюють легкозаймисті суміші.

Для забезпечення пожежної безпеки передбачається комплекс технічних та організаційних заходів, зокрема застосування автоматичних систем пожежогасіння, заземлення обладнання, використання вибухозахищеного електрообладнання (Ех-виконання), а також оснащення виробничих зон первинними засобами пожежогасіння.

Особливу увагу приділено вибору та розміщенню вогнегасників. У зонах можливого розливу та випаровування вуглеводнів застосовуються порошкові вогнегасники типу ОП-5 та ОП-10, які ефективні для гасіння пожеж класу В (горючі рідини) та С (горючі гази). У електротехнічних приміщеннях та біля щитового обладнання використовуються вуглекислотні вогнегасники типу ВВК-5, які не залишають залишків і не спричиняють пошкодження обладнання. Пінні вогнегасники застосовуються у відкритих технологічних зонах,

резервуарних парках та місцях можливого розливу бензолу, оскільки піна ефективно ізолює поверхню рідини від доступу кисню.

Розміщення вогнегасників здійснюється таким чином, щоб відстань до будь-якого робочого місця не перевищувала нормативні значення, встановлені правилами пожежної безпеки. Вони встановлюються вздовж евакуаційних шляхів, біля входів до виробничих приміщень, а також у безпосередній близькості до дефлегматора та насосного обладнання. Класи вогнегасників та область застосування наведені у таблиці 4.5.

Таблиця 4.5 – Класи вогнегасників та область застосування

Тип вогнегасника	Клас пожежі	Область застосування
Порошковий (ОП-5, ОП-10)	В, С, Е	Вуглеводні, газы, електроустановки
Вуглекислотний (ВВК-5)	В, Е	Електрообладнання, щитові
Пінний	А, В	Розливи бензолу, відкриті зони

Засоби індивідуального захисту

Для працівників, які обслуговують дефлегматор, передбачено обов'язкове використання засобів індивідуального захисту відповідно до ДСТУ EN ISO 13688:2016 [31]. ЗІЗ підбираються з урахуванням наявності парів бензолу, можливих температурних впливів та ризику статичної електрики. Використовуються фільтрувальні протигази марки А, призначені для захисту від органічних парів і газів, антистатичний спецодяг, хімічно стійкі рукавиці та захисне взуття з антиковзними та антистатичними властивостями. Додатково застосовуються захисні окуляри або щитки для запобігання потраплянню парів та аерозолів у зону очей.

Заходи підвищення безпеки праці при модернізації дефлегматора

Підвищення рівня безпеки праці при модернізації дефлегматора установки алкілування бензолу базується на комплексному поєднанні

технічних, організаційних та санітарно-гігієнічних заходів, спрямованих на мінімізацію ризиків впливу токсичних, вибухопожежонебезпечних та фізичних факторів. Оскільки в процесі експлуатації дефлегматора присутні пари бензолу та інших легкозаймистих вуглеводнів, основним пріоритетом є запобігання утворенню вибухонебезпечних концентрацій та виключення джерел займання.

Ключовим технічним напрямом модернізації є підвищення герметичності апарата та трубопровідних з'єднань. Для цього застосовуються сучасні ущільнювальні матеріали, зменшується кількість фланцевих стиків, а зварні з'єднання використовуються як переважні.

Важливим напрямом є автоматизація контролю технологічного процесу. Передбачається встановлення датчиків температури, тиску та рівня, а також систем безперервного газоаналізу повітря робочої зони. При перевищенні гранично допустимих концентрацій парів бензолу або досягненні нижньої концентраційної межі вибуховості (близько 1,2 % об'ємних) система повинна автоматично подавати сигнал тривоги та ініціювати аварійне відключення обладнання.

Окрему роль відіграє вдосконалення вентиляційних систем. У виробничих приміщеннях передбачається організація припливно-витяжної вентиляції з підвищеною кратністю повітрообміну, а також локальні відсмоктувачі безпосередньо у місцях потенційних витоків. Це дозволяє підтримувати концентрацію шкідливих речовин у межах, встановлених ГН 3.3.5-8.6.6.1 [32]. Основні технічні заходи підвищення безпеки наведені у таблиці 4.6.

Таблиця 4.6 - Основні технічні заходи підвищення безпеки

Напрямок заходів	Зміст реалізації	Очікуваний ефект
Герметизація обладнання	Заміна ущільнень, зменшення фланцевих з'єднань	Зниження витоків бензолу

Продовження таблиці 4.6

Автоматизація контролю	Датчики Т, Р, LEL-газоаналіз	Аварійне відключення при небезпеці
Вентиляція	Локальні відсмоктувачі, припливно-витяжна система	Зниження концентрації парів
Контроль середовища	Безперервний газоаналіз повітря	Попередження вибухонебезпечних умов
Теплоізоляція	Ізоляція гарячих поверхонь	Зниження ризику опіків

5 Розрахунки, що підтверджують працездатність та надійність конструкцій

5.1 Визначення основних геометричних розмірів апарата

Метою розрахунку є визначення необхідної площі теплообміну та вибір конструкції апарата, яка оптимально задовольняє заданим технологічним умовам та конструктивні розміри кожухотрубного теплообмінника.

Оскільки відбувається конденсація пари, то теплообмінник доцільно приймати вертикальним і для кращих умов теплообміну пару слід подавати в міжтрубний простір.

Позначимо всі параметри цільового продукту – парів бензолу – індексом «1», а всі параметри води – індексом «2».

Розрахункова схема зображена на рисунку 5.1

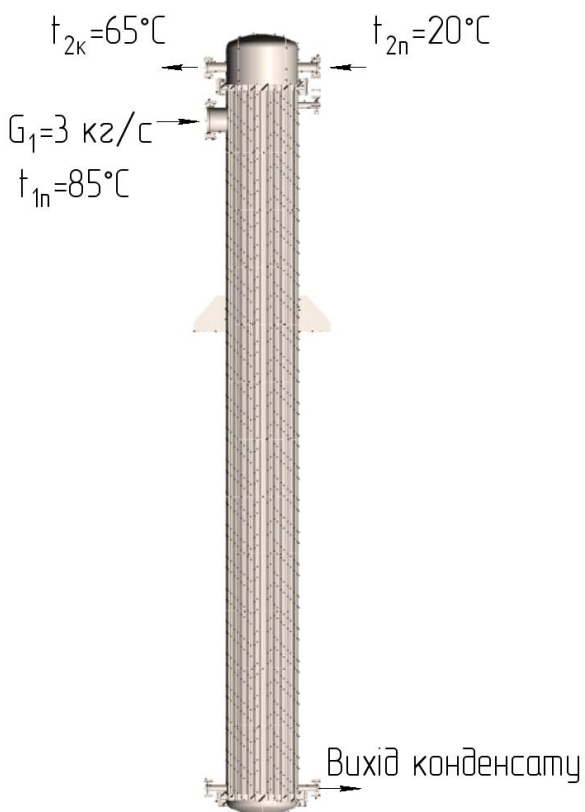


Рисунок 5.1 – Розрахункова схема

Вихідні дані:

Початкова температура парів бензолу, t_{1n} , °C 85;

Початкова температура води t_{2n} , °C 20;

Кінцева температура води, $t_{2к}$, °C 65;

Продуктивність за парами бензолу, G_1 кг/с 3.

Розрахунок буде проводитися за алгоритмом, запропонованим авторами [33].

Більшу різницю температур на кінцях теплообмінника (між холодним та гарячим теплоносієм) визначають по формулі

$$\Delta t_6 = t_{1к} - t_{2п} = 85 - 20 = 65^\circ\text{C}.$$

Визначаємо меншу різницю температур на кінцях теплообмінника (між холодним та гарячим теплоносієм):

$$\Delta t_m = t_{1п} - t_{2к} = 85 - 65 = 20^\circ\text{C}.$$

Середньоарифмічна різниця температур:

$$\Delta t_{cp} = \frac{\Delta t_6 - \Delta t_m}{\ln\left(\frac{\Delta t_6}{\Delta t_m}\right)} = \frac{65 - 20}{\ln\left(\frac{65}{20}\right)} = 38,2^\circ\text{C}.$$

$\Delta t_6 = 65^\circ\text{C}$ - максимальна різниця між температурами теплоносіїв;

$\Delta t_m = 20^\circ\text{C}$ – мінімальна різниця між температурами теплоносіїв.

Середня температура парів бензолу:

$$t_{1сep} = t_{1п} = 85^\circ\text{C}$$

Середня температура води:

$$t_{2сep} = t_{1сep} - \Delta t_{cp} = 85 + 38,2 = 46,8^\circ\text{C}.$$

Теплофізичні властивості парів бензолу при температурі 85°C

μ_1 – коефіцієнт динамічної в'язкості парів бензолу: $\mu_1 = 8,9 \cdot 10^{-4} \text{ Па} \cdot \text{с}$

ρ_1 – густина парів бензолу: $\rho_1 = 2,65 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$

λ_1 – коефіцієнт теплопровідності парів бензолу: $\lambda_1 = 0,015 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{град}}$

C_1 – теплоємність парів бензолу: $C_1 = 1280 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{град}}$

Теплофізичні властивості води при середній температурі $46,8^\circ\text{C}$

μ_2 – коефіцієнт динамічної в'язкості води: $\mu_2 = 5,91 \cdot 10^{-4} \text{ Па} \cdot \text{с}$

ρ_2 – густина води: $\rho_2 = 989 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$

λ_2 – коефіцієнт теплопровідності води: $\lambda_2 = 0,641 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{град}}$

C_2 – теплоємність води: $C_2 = 4176 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{град}}$

Теплове навантаження:

$$Q = 1,1 \cdot r \cdot G_2 = 1,1 \cdot 3,94 \cdot 10^5 \cdot 3 = 1,3 \cdot 10^6 \text{ Вт},$$

де $G_1 = 3 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$ - масова витрата парів бензолу;

$r = 3,94 \cdot 10^5 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$ - теплота пароутворення.

Коефіцієнт 1,1 враховує 1% витрат тепла в навколишнє середовище.

Масова витрата води:

$$G_2 = \frac{Q}{C_2 \cdot (t_{2\kappa} - t_{2\text{п}})} = \frac{1,3 \cdot 10^6}{4176 \cdot (65 - 20)} = 6,92 \text{ кг/с},$$

$C_2 = 4176 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{град}}$ - теплоємність води.

Визначаємо об'ємні витрати парів бензолу:

$$V_1 = \frac{G_1}{\rho_1} = \frac{3}{2,65} = 1,13 \frac{\text{м}^3}{\text{с}}$$

$G_1 = 3 \text{ кг/с}$ - масова витрата парів бензолу.

де $\rho_1 = 2,65 \text{ кг/м}^3$ - густина парів бензолу;

Визначаємо об'ємні витрати води:

$$V_2 = \frac{G_2}{\rho_2} = \frac{6,92}{989} = 6,99 \cdot 10^{-3} \frac{\text{м}^3}{\text{с}},$$

де $\rho_2 = 989 \text{ кг/м}^3$ - густина води;

$G_2 = 6,92 \text{ кг/с}$ - масова витрата води.

Орієнтовно визначаємо потрібну площу теплообміну з основного рівняння теплопередачі, попередньо задавшись, значенням коефіцієнта теплопередачі, оскільки посилаючись на авторів [33] коефіцієнт теплопередачі від води до парів бензолу лежить в межах $K = 120 - 340 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{град}}$.

Визначаємо орієнтовну площу теплообміну:

$$F = \frac{Q}{K \cdot \Delta t_{cp}} = \frac{1,3 \cdot 10^6}{340 \cdot 38,2} = 100 \text{ м}^2,$$

де Q - теплове навантаження;

Δt_{cp} - середня різниця температур, $^{\circ}\text{C}$

Приймаємо попередньо значення критерію Рейнольдса для води в трубному просторі $Re=12000$.

Тоді попередньо швидкість в трубах повинна бути:

$$w_2^{op} = \frac{Re \cdot \mu_2}{d_v \cdot \rho_2} = \frac{12000 \cdot 5,9 \cdot 10^{-4}}{0,021 \cdot 11} = 0,341 \text{ м/с},$$

$d_v = 0,021 \text{ м}$ – внутрішній діаметр теплообмінної труби.

Орієнтовне число труб при $Re=12000$ [33]:

$$n' = \frac{V_2}{\left(\frac{\pi \cdot d_v^2}{4}\right) \cdot w_2^{op}} = \frac{6,99 \cdot 10^{-3}}{\left(\frac{3,14 \cdot 0,021^2}{4}\right) \cdot 0,341} = 59 \text{ шт.}$$

По визначеній площі теплообміну за ТУ 3612-024-00220302-02 найближчий теплообмінник: площа поверхні $F=97 \text{ м}^2$, діаметр кожуха $D = 600 \text{ мм}$, діаметр труб $d = 25 \times 2 \text{ мм}$, довжина труб $L = 6 \text{ м}$, кількість ходів $z = 4$, площа найвужчого перерізу в міжтрубному просторі, $S_2=4 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2$.

Визначаємо швидкість речовини в трубах:

$$w_2 = \frac{V_2}{\left(\frac{\pi \cdot d_v^2}{4}\right) \cdot \frac{n}{2}} = \frac{6,99 \cdot 10^{-3}}{\left(\frac{\pi \cdot 0,021^2}{4}\right) \cdot \frac{206}{4}} = 0,392 \text{ м/с},$$

V_2 - об'ємні витрати води;

Критерій Рейнольдса для води:

$$Re_2 = w_2 \cdot d_v \cdot \frac{\rho_2}{\mu_2} = 0,392 \cdot 0,021 \cdot \frac{989,1}{5,9 \cdot 10^{-4}} = 13789$$

де $\rho_2 = 989,1 \text{ кг/м}^3$ - густина води;

$\mu_2 = 5,9 \cdot 10^{-4} \text{ Па} \cdot \text{с}$, - коефіцієнт динамічної в'язкості води;

Води тече по трубах у турбулентному режимі.

Критерій Прандтля для води:

ЛН21.01.101.001 ПЗ	Інд. змін.	Дата видання	Мова UA	Аркуш 56
--------------------	------------	--------------	------------	-------------

$$Pr_2 = C_2 \cdot \frac{\mu_2}{\lambda_2} = 4175,7 \cdot \frac{5,9 \cdot 10^{-4}}{0,64} = 3,85;$$

$\lambda_2 = 0,64 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{град}}$ - коефіцієнт теплопровідності води

Визначаємо температуру стінки з боку обох теплоносіїв. Задамося значеннями допоміжних величин $A_2 = 0,17$ та $A_1 = 0,45$.

Температура стінки з боку води:

$$t_{\text{ст}2} = t_{2\text{сер}} + A_2 \cdot \Delta t_{\text{ср}} = 46,8 + 0,17 \cdot 38 = 53,3^\circ\text{C}.$$

Температура стінки з боку парів бензолу:

$$t_{\text{ст}1} = t_{1\text{сер}} - A_1 \cdot \Delta t_{\text{ср}} = 85 - 0,45 \cdot 38,2 = 67,8^\circ\text{C}.$$

Теплофізичні властивості води при температурі стінки $53,3^\circ\text{C}$

$\mu_{2\text{ст}}$ - коефіцієнт динамічної в'язкості води: $\mu_{2\text{ст}} = 5,31 \cdot 10^{-4} \text{ Па} \cdot \text{с}$

$\lambda_{2\text{ст}}$ - коефіцієнт теплопровідності води: $\lambda_{2\text{ст}} = 0,649 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{град}}$

$C_{2\text{ст}}$ - теплоємність води: $C_{2\text{ст}} = 4177 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{град}}$

Визначаємо критерій Прандтля для води при температурі стінки $53,3^\circ\text{C}$.

$$Pr_{2\text{ст}} = C_{2\text{ст}} \cdot \frac{\mu_{2\text{ст}}}{\lambda_{2\text{ст}}} = 4177,3 \cdot \frac{5,3 \cdot 10^{-4}}{0,649} = 3,42$$

де $\mu_{2\text{ст}} = 5,3 \cdot 10^{-4}, \text{ Па} \cdot \text{с}$ - коефіцієнт динамічної в'язкості води при $53,3^\circ\text{C}$;

$\lambda_{2\text{ст}} = 0,649 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{град}}$ - коефіцієнт теплопровідності води, при $53,3^\circ\text{C}$;

$C_{2\text{ст}} = 4177,3 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{град}}$. - теплоємність води, при $53,3^\circ\text{C}$.

Рівняння процесу тепловіддачі при турбулентному режимі руху в трубах ($Re > 10000$) має вигляд, причому Nu_1 - критерій Нусельта, який характеризує теплообмін на границі «стінка-речовина»:

$$Nu_2 = 0,021 \cdot Re_2^{0,8} \cdot Pr_2^{0,43} \cdot \left(\frac{Pr_2}{Pr_{2\text{ст}}}\right)^{0,25} = 0,021 \cdot 13789^{0,8} \cdot 3,85^{0,43} \cdot \left(\frac{3,85}{3,42}\right)^{0,25} \\ = 79,15$$

Визначаємо коефіцієнт тепловіддачі від стінки труби до води:

$$\alpha_2 = Nu_2 \cdot \frac{\lambda_2}{d_v} = 79,15 \cdot \frac{0,64}{0,021} = 2416 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{град}.$$

де $d_v = 0,021\text{м}$ – внутрішній діаметр труб;

$\lambda_2 = 0,64 \frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{град}}$ - коефіцієнт теплопровідності води.

Розрахункова температура плівки конденсату:

$$t_{1\text{пл}} = \frac{t_{1\text{п}} + t_{1\text{ст}}}{2} = \frac{85 + 67,8}{2} = 76,4\text{ }^{\circ}\text{C}$$

Теплофізичні властивості плівки конденсату:

$\mu_{1\text{пл}}$ – коефіцієнт динамічної в'язкості плівки, $\mu_{1\text{пл}} = 3,29 \cdot 10^{-4} \text{ Па}\cdot\text{с}$

$\rho_{1\text{пл}}$ – густина плівки, $\rho_{1\text{пл}} = 818,8 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$

$\lambda_{1\text{пл}}$ – коефіцієнт теплопровідності плівки, $\lambda_{1\text{пл}} = 0,131 \frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{К}}$

Коефіцієнт тепловіддачі в міжтрубному просторі:

$$\alpha_1 = 1,15 \cdot \sqrt[4]{\frac{(\lambda_{1\text{пл}}^3 \cdot \rho_{1\text{пл}}^2 \cdot 9,81 \cdot r)}{\mu_{1\text{пл}} \cdot (t_{1\text{п}} - t_{1\text{ст}}) \cdot \text{Н}}} = 1,15 \cdot \sqrt[4]{\frac{(0,131^3 \cdot 818,8^2 \cdot 9,81 \cdot 3,94 \cdot 10^5)}{3,29 \cdot 10^{-4} \cdot (76,4 - 67,8) \cdot 6}} = 880 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}.$$

Термічний опір стінки та забруднень, $\text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{град})$ [10]:

$$\sum r_{\text{ст}} = \frac{\delta_{\text{ст}}}{\lambda_{\text{ст}}} + r_{\alpha 1} + r_{\alpha 2} = \frac{0,002}{17,5} + \frac{1}{11600} + \frac{1}{1400} = 9,15 \cdot 10^{-4};$$

де, за таблицею XXXI [33]:

$\lambda_{\text{ст}} = 17,5 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ – теплопровідність матеріалу стінки;

$\delta_{\text{ст}} = 0,002$ – товщина стінки труби, м;

$r_{\alpha 1}$ - термічний опір для парів бензолу;

$r_{\alpha 2}$ - термічний опір для води.

Визначаємо коефіцієнт теплопередачі:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum r_{\text{ст}} + \frac{1}{\alpha_2}} = \frac{1}{\frac{1}{880} + 9,15 \cdot 10^{-4} + \frac{1}{2416}} = 405,6 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{град})$$

Перевіряємо прийняті раніше значення співвідношень коефіцієнтів теплопередачі до коефіцієнтів тепловіддачі:

$$A'_1 = \frac{K}{\alpha_1} = \frac{405,6}{880} = 0,46$$

$$A'_2 = \frac{K}{\alpha_2} = \frac{405,6}{2415,5} = 0,168$$

Відповідні розбіжності становлять, %:

ЛН21.01.101.001 ПЗ	Інд. змін.	Дата видання	Мова UA	Аркуш 58
--------------------	------------	--------------	------------	-------------

$$\delta_1 = \frac{|A'_1 - A_1| \cdot 100}{A'_1} = \frac{|0,46 - 0,45| \cdot 100}{0,46} = 2,38\% ;$$

$$\delta_2 = \frac{|A'_2 - A_2| \cdot 100}{A'_2} = \frac{|0,168 - 0,17| \cdot 100}{0,168} = 1,23\% .$$

Оскільки немає розбіжності більші за 10% проводити уточнюючий перерахунок не потрібно.

Визначаємо поверхневу густину теплового потоку:

$$q = K \cdot \Delta T_{cp} = 405,6 \cdot 38,2 = 15488 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$$

Визначаємо площу поверхні теплообмінного апарату:

$$F_p = \frac{Q}{q} = \frac{1,3 \cdot 10^{-6}}{15488} = 83,95 \text{ м}^2$$

Запас площі поверхні:

$$\Delta = \frac{(F_t - F_p) \cdot 100}{F_t} = \frac{(97 - 83,95) \cdot 100}{97} = 13,5\% .$$

Результати розрахунку:

кількість труб, n	206;
кількість ходів, z	4;
число Рейнольдса в трубному просторі, Re_2	13789;
коефіцієнт тепловіддачі парів бензолу $\alpha_1, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{град}}$	880 ;
коефіцієнт тепловіддачі води $\alpha_2, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{град}}$	2416;
коефіцієнт теплопередачі $K, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{град}}$	405,6;
витрати води $G_2, \text{кг/с}$	6,92;
Розрахункова площа теплообміну $F_p, \text{м}^2$	83,95 ;

Висновок: В результаті розрахунку визначена площа поверхні теплообміну, та вибраний вертикальний 4-ох ходовий теплообмінник, діаметром 600 мм. Поверхня теплообміну теплообмінника 97 м², висота 6 м, що забезпечує запас поверхні теплообміну.

5.2 Розрахунок штуцерів

Метою розрахунку є визначення основних параметрів і вибір стандартних штуцерів. Розрахункова схема зображена на рисунку 5.2.

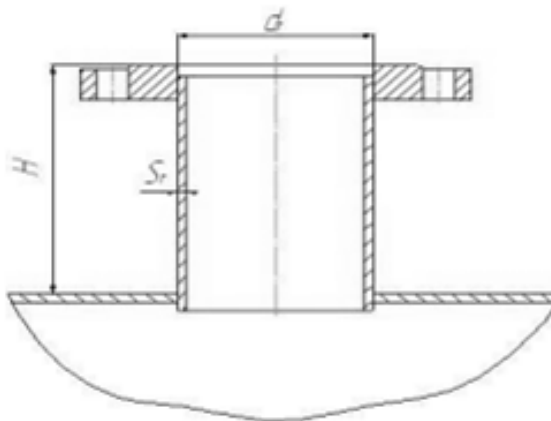


Рисунок 5.2 – Розрахункова схема штуцера

Вихідні дані:

Масова витрата парів бензолу, G_1 , кг/с 3;
масова витрата води G_2 , кг/с 6,92.

Розрахунок буде проводитися за алгоритмом, запропонованим авторами [33]. Розрахунок передбачає вибір стандартних штуцерів за тиском і умовним діаметром, що далі визначається.

Розраховуємо діаметр штуцера для входу парів бензолу:

$$d_{шт1} = 1,13 \cdot \sqrt{\frac{G_1}{\rho_1 \cdot w_p}} = 1,13 \cdot \sqrt{\frac{3}{2,65 \cdot 35}} = 0,451 \text{ м.}$$

де $w_p = 35$ м/с – рекомендована швидкість для пару;

$\rho_1 = 2,65$ кг/м³ – густина парів бензолу,

Розраховуємо діаметр штуцера для входу і виходу води:

$$d_{шт2} = 1,13 \cdot \sqrt{\frac{G_2}{\rho_2 \cdot w_r}} = 1,13 \cdot \sqrt{\frac{6,92}{989 \cdot 1,5}} = 0,077 \text{ м.}$$

де $w_r = 1,5$ м/с – рекомендована швидкість для рідини

$\rho_2 = 989$ кг/м³ – густина води,

Розраховуємо діаметр штуцера для виходу конденсату:

$$d_{шт3} = 1,13 \cdot \sqrt{\frac{G_1}{\rho_3 \cdot w_r}} = 1,13 \cdot \sqrt{\frac{3}{818,8 \cdot 1,5}} = 0,056 \text{ м.}$$

$\rho_3 = 818,8 \text{ кг/м}^3$ – густина конденсату,

Для пари виходить великий штуцер, приймаємо рішення прийняти стандартний штуцер для міжтрубного простору для даного апарату $d_T = 219 \text{ мм}$.

Для входу парів бензолу:

$$d_{шт1'} = \frac{d_T - 2 \cdot S_T}{1000} = \frac{219 - 2 \cdot 6}{1000} = 0,207 \text{ м.}$$

де $d_T = 219 \text{ мм}$ – діаметр штуцера,

$S_T = 6 \text{ мм}$ – товщина стінки штуцера.

Для входу та виходу води:

$$d_{шт2'} = \frac{d_T - 2 \cdot S_T}{1000} = \frac{89 - 2 \cdot 5}{1000} = 0,079 \text{ м.}$$

Для виходу конденсату:

$$d_{шт3'} = \frac{d_T - 2 \cdot S_T}{1000} = \frac{57 - 2 \cdot 3}{1000} = 0,051 \text{ м.}$$

Перераховуємо дійсну швидкість теплоносіїв в штуцерах:

Для парів бензолу:

$$w_{11} = 4 \cdot \frac{G_1}{\pi \cdot \rho_1 \cdot d_{шт1'}^2} = 4 \cdot \frac{3}{3,14 \cdot 2,65 \cdot 0,207^2} = 33,64 \text{ м/с.}$$

Для води:

$$w_{22} = 4 \cdot \frac{G_2}{\pi \cdot \rho_2 \cdot d_{шт2'}^2} = 4 \cdot \frac{3,6,92}{3,14 \cdot 989 \cdot 0,079^2} = 1,42 \text{ м/с.}$$

Для конденсату:

$$w_{33} = 4 \cdot \frac{G_1}{\pi \cdot \rho_2 \cdot d_{шт3'}^2} = 4 \cdot \frac{3}{3,14 \cdot 818,8 \cdot 0,051^2} = 1,79 \text{ м/с.}$$

Розміри нормалізованих штуцерів за [33]:

1) 1 штуцер 219 – 6 – 160 – 12X18Н10Т – 10 ДСТУ 16045:2008 для входу парів бензолу, що мають наступні параметри:

Номінальний діаметр D_y , м 0,219;

Діаметр отвору d_t , м 0,207;

Товщина стінки S_T , м	0,006;
Висота штуцера H_T , м	0,160;

2) 2 штуцера 89 – 5 – 155 – 12X18Н10Т – 10 ДСТУ 16045:2008 для входу і виходу води, що мають наступні параметри:

Номінальний діаметр D_y , м	0,089;
Діаметр отвору d_T , м	0,079;
Товщина стінки S_T , м	0,005;
Висота штуцера H_T , м	0,155;

3) 1 штуцер 57 – 3 – 155 – 12X18Н10Т – 10 ДСТУ 16045:2008 для виходу конденсату, що має наступні параметри:

Номінальний діаметр D_y , м	0,057;
Діаметр отвору d_T , м	0,051;
Товщина стінки S_T , м	0,003;
Висота штуцера H_T , м	0,155;

Висновок: в результаті проведених розрахунків встановлено геометричні розміри штуцерів для подачі теплоносіїв: для входу парів бензолу – 0,219 м, для входу та виходу води – 0,089 м, для виходу конденсату 0,057 м.

5.3 Гідравлічний розрахунок

Метою розрахунку є визначення гідравлічного опору трубного простору теплообмінника. Розрахункова схема зображена на рисунку 5.3.

ЛН21.01.101.001 ПЗ	Інд. змін.	Дата видання	Мова UA	Аркуш 62
--------------------	------------	--------------	------------	-------------

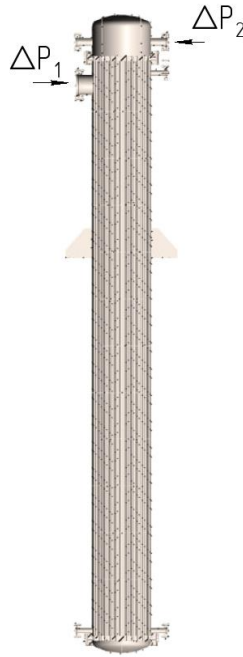


Рисунок 5.3 – Розрахункова схема гідравлічного опору

Вихідні дані:

Швидкість руху води в штуцерах, м/с, w_{22} , 0,392;
 Критерій Рейнольдса для води, Re_2 , 13789;
 Густина води, кг/м³, ρ_2 , 989.

Розрахунок буде проводитися за алгоритмом, запропонованим авторами [33].

Оскільки в трубах рухається вода, вважаємо, що труби теплообмінника сталеві з незначною корозією.

Відносна шорсткість становитиме:

$$\varepsilon = \frac{\Delta}{d_v} = \frac{1 \cdot 10^{-4}}{0,021} = 4,76 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

де Δ - висота виступів шорсткостей, $\Delta = 0,1 \text{ мм}$ [19].

Для розрахунку коефіцієнта тертя використовуємо формулу:

$$\lambda = 0,11 \cdot \left(\varepsilon + \frac{68}{Re_1} \right)^{0,25} = 0,11 \cdot \left(6,25 \cdot 10^{-3} + \frac{68}{17379} \right)^{0,25} = 0,035$$

Обираємо значення коефіцієнтів місцевого опору в трубному просторі:

Вхід і вихід в труби, ζ_{11}	1,5;
Поворот між ходами, ζ_{12}	1;
Вхідна і вихідна камера, ζ_{13}	2,5.

При цьому опір у вхідній і вихідній камері рахується за швидкістю в штуцерах. Враховуючи кількість ходів ($z=4$), гідравлічний опір в трубному просторі буде розраховуватися за формулою:

$$\Delta P_2 = 2 \cdot \zeta_{11} \cdot \left(\rho_2 \cdot \frac{w_{22}^2}{2} \right) + \left[(z-1) \cdot \zeta_{13} + 2 \cdot z \cdot \zeta_{12} + \lambda \cdot \frac{L \cdot z}{d_z} \right] \cdot \rho_2 \cdot \frac{w_2^2}{2} =$$

$$2 \cdot 1,5 \cdot \left(989 \cdot \frac{1,43^2}{2} \right) + \left[(4-1) \cdot 2,5 + 2 \cdot 4 \cdot 1 + 0,035 \cdot \frac{6 \cdot 4}{0,025} \right] \cdot 989 \cdot \frac{0,39^2}{2} =$$

$$6721 \text{ Па},$$

Витрати потужності на переміщення води в теплообміннику:

$$N_2 = \Delta P_2 \cdot \frac{G_2}{\rho_2} = 6721 \cdot \frac{6,92}{989} = 47 \text{ Вт},$$

де $G_2 = 6,92 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$ - масова витрата води

$\rho_2 = 989 \text{ кг/м}^3$ – густина води.

Висновок: на подолання сил тертя трубного простору теплообмінника витрачається близько 47 Вт.

5.4 Розрахунок товщини стінки циліндричної обичайки

Метою розрахунку є визначення товщини стінки циліндричної обичайки та перевірка її на міцність під дією внутрішнього тиску [34]. Схема до розрахунку циліндричної обичайки показна на рисунку 5.4.

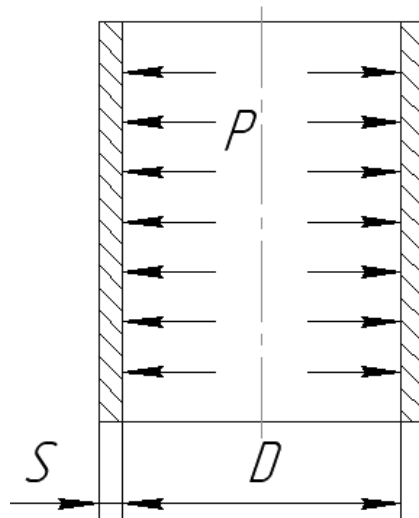


Рисунок 5.4 – Розрахункова схема циліндричної обичайки навантаженої внутрішнім надлишковим тиском

Вихідні дані:

Внутрішній діаметр апарату D , м 0,6;

Розрахунковий тиск p_r , МПа 0,12;

Розрахункова температура t , °C 85;

Допустиме напруження для матеріалу, $[\sigma]$ МПа 180,6;

Матеріал 16ГС.

Розрахунок передбачає визначення товщини стінки обичайки, що знаходиться під дією внутрішнього тиску, із урахуванням додатків на корозію [34].

Розрахункова товщина стінки:

$$s_r = \frac{p_r \cdot D}{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi - p_r} = \frac{0,12 \cdot 0,6}{2 \cdot 180,6 \cdot 0,9 - 0,12} = 2,216 \cdot 10^{-4} \text{ м.}$$

Де $\varphi = 0,9$ - коефіцієнт міцності зварного шва

Сума додатків до розрахункової товщини:

$$c = c_1 + c_2 = 2 \cdot 10^{-3} + 0,6 \cdot 10^{-3} = 2,6 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Де $c_1 = 2 \cdot 10^{-3}$ м, $c_2 = 0,6 \cdot 10^{-3}$ м

Проведемо розрахунок виконавчої товщини:

ЛН21.01.101.001 ПЗ	Інд. змін.	Дата видання	Мова UA	Аркуш 65
--------------------	------------	--------------	------------	-------------

$$s_2 = s_r + c = 2,216 \cdot 10^{-4} + 2,6 \cdot 10^{-3} = 2,82 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Приймаємо товщину стінки 4 мм.

Так як величина розрахункової виконавчої товщини менша за прийняту, переходимо до перевірки виконання умови міцності.

Допустимий тиск:

$$[\rho] = \frac{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi \cdot (s - c)}{D + (s - c)} = \frac{2 \cdot 180,5 \cdot 0,9 \cdot (4 \cdot 10^{-3} - 2,6 \cdot 10^{-3})}{0,6 + (4 \cdot 10^{-3} - 2,6 \cdot 10^{-3})} = 0,757 \text{ МПа.}$$

Перевіряємо умову міцності:

$$\rho_r \leq [\rho],$$

$$0,12 \text{ МПа} \leq 0,757 \text{ МПа.}$$

Висновок: Через те, що умови застосування формул виконуються, а допустимий внутрішній надлишковий тиск більший за розрахунковий, то приймаємо товщину стінки $s = 4 \text{ мм}$.

5.5 Розрахунок еліптичного днища

Метою розрахунку є визначення товщини днища та перевірка виконання умови міцності за умов навантаження зовнішнім тиском.

Схема до розрахунку наведена на рисунку 5.5:

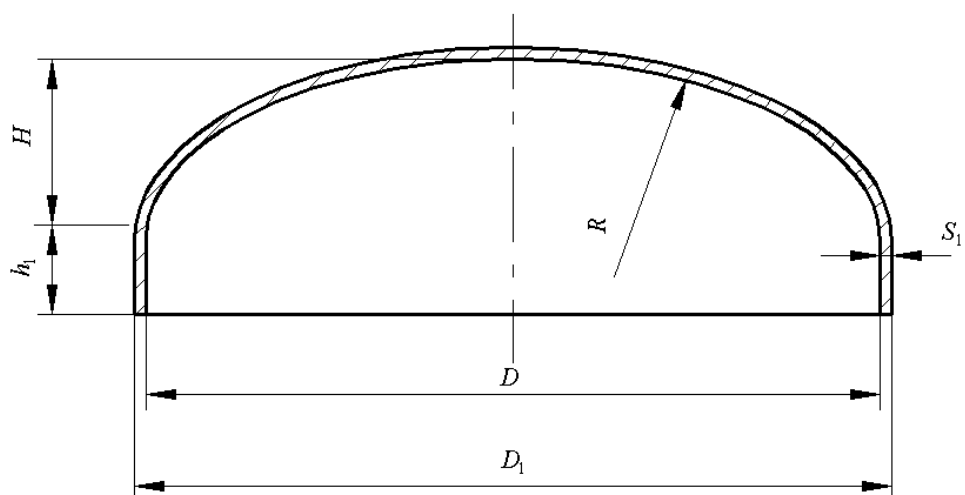


Рисунок 5.5 – Розрахункова схема еліптичного днища

Вихідні дані:

Внутрішній діаметр апарату D , м 0,6;
тиск P , МПа 0,12;
Допустиме напруження для матеріалу, $[\sigma]$ МПа 180,5;
Матеріал 16ГС.
Розрахунок буде проводитися за алгоритмом, запропонованим авторами [34].
Розрахункова товщина днища:

$$S_r = \frac{P \cdot R}{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi - 0,5P} = \frac{0,12 \cdot 0,6}{2 \cdot 180,5 \cdot 0,9 - 0,5 \cdot 0,12} = 2,21 \cdot 10^{-3},$$

де $R = D$ – радіус кривизни при вершині днища.

Додаток до розрахункової товщини для компенсації ерозії C_e , м:

$$C_e = 0.$$

Додаток до розрахункової товщини для компенсації корозії і ерозії C_1 , м:

$$C_1 = 2 \cdot 10^{-3} \text{ м},$$

Виконавча товщина стінки кришки у першому наближенні S^1 , м:

$$S_\partial^1 = S_r + C_1 + C_0 = 2,21 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 10^{-3} + 0,1 \cdot 10^{-3} = 2,2 \cdot 10^{-3} \text{ м},$$

де $C_0 = 0,1 \cdot 10^{-4}$ м – додаток, який вибирається конструктивно для кожного окремого випадку.

Приймаємо стандартну товщину днища $S = 4$ мм.

Допустимий внутрішній надлишковий тиск $[\rho]$, МПа:

$$[\rho] = \frac{2[\sigma]\varphi_r(S_\partial - C)}{R_e + 0,5(S_\partial - C)} = \frac{2 \cdot 180,6 \cdot 0,9 \cdot (4 \cdot 10^{-3} - 2,1 \cdot 10^{-3})}{0,6 + 0,5 \cdot (4 \cdot 10^{-3} - 2,1 \cdot 10^{-3})} = 1,03 \text{ МПа}.$$

Перевірка умови міцності:

$$\rho \leq [\rho]$$

$$0,12 \text{ МПа} < 1,03 \text{ МПа},$$

Умова міцності виконується

Висновок: Через те, що умови застосування формул виконуються, а допустимий внутрішній надлишковий тиск більший за розрахунковий, то приймаємо товщину днища $s = 4$ мм

5.6 Розрахунок опорних лап

Метою розрахунку опорних лап для дефлегматора є визначення необхідного типу опор та перевірка несучої спроможності обичайки для обраних опор

Розрахункова схема наведена на рисунку 5.6.

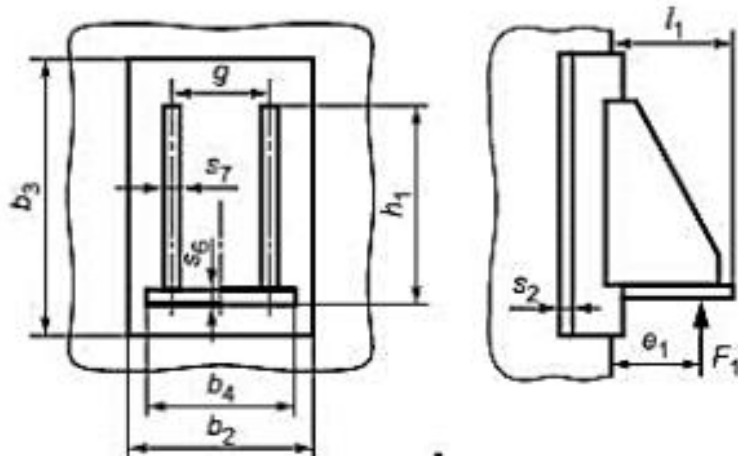


Рисунок 5.6 – Опорна лапа

Вихідні дані:

Внутрішній тиск p , МПа	0,12;
Внутрішній діаметр обичайки D , м	0,6;
Товщина стінки обичайки S , м	0,04;
Кількість опор n , кількість	4;
Допустиме напруження для матеріалу, $[\sigma]$ МПа	180,6;
Вага апарата G , МН	0,012

Розрахунок виконується за методикою [35]:

Умови застосування розрахункових формул

$$\frac{S - C}{D_p} \leq 0,05$$

$$\frac{0,004 - 0,002}{0,6} = 0,033 \leq 0,05$$

$$g \geq 0,2h_1$$

$$0,18 \geq 0,2 \cdot 0,3$$

$$0,04 \leq \frac{h_1}{D_p} \leq 0,5$$

$$0,04 \leq \frac{0,3}{0,6} = 0,05 \leq 0,5$$

Умови застосування розрахункових формул виконуються

Відстань між точкою докладання зусиль і обичайкою e_1 , м

$$e_1 = \frac{5 \cdot l_1}{6} = \frac{5 \cdot 0,15}{6} = 0,125.$$

Розрахункова осьова розтягуюча або стискаюча сила (стискаюча сила зі знаком мінус) F , МН

$$F = G = 12 \cdot 10^{-3}.$$

Вертикальна сила, яка діє на опорну лапу F_1 , МН

Через те що $M = 0$

$$F_1 = \frac{G}{4} = \frac{12 \cdot 10^{-3}}{4} = 3 \cdot 10^{-4}.$$

Еквівалентне плече навантаження e_{1e} , м

$$e_{1e} = e_1 = 0,125.$$

Параметр x

$$x = \ln\left(\frac{D_p}{2(S - C)}\right) = \ln\left(\frac{0,6}{2 \cdot (0,004 - 0,002)}\right) = 5,011.$$

Параметр y (визначається для опор типів А, В і С)

$$y = \ln\left(\frac{h_1}{D_p}\right) = \ln\left(\frac{0,3}{0,6}\right) = -0,693.$$

Коефіцієнт K_7

$$K_7 = \exp[(-5,964 - 11,395x - 18,984y - 2,413x^2 - 7,286xy - 2,042y^2 + 0,1322x^3 + 0,4833x^2y + 0,8469xy^2 + 1,428y^3)10^{-2}]$$

$$K_7 = \exp[(-5,964 - 11,395 \cdot 5,01 - 18,984 \cdot (-0,693) - 2,413 \cdot 5,01^2 - 7,286 \cdot 3,53 \cdot (-0,693) - 2,042 \cdot (-0,693)^2 + 0,1322 \cdot 5,01^3 + 0,4833 \cdot 5,01^2 \cdot (-0,693) + 0,8469 \cdot 5,01 \cdot (-0,693)^2 + 1,428 \cdot (-0,693)^3)10^{-2}] = 0,466.$$

Загальне мембранне напруження $\bar{\sigma}_m$, МПа

$$\bar{\sigma}_m = \frac{p \cdot D_p}{2 \cdot (S-C)} = \frac{0,12 \cdot 0,6}{2 \cdot (0,004 - 0,002)} = 18.$$

Коефіцієнт $\vartheta_1 = 0,3$.

Коефіцієнт ϑ_2 :

$$\vartheta_2 = \frac{\bar{\sigma}_m}{K_2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi} = \frac{18}{1,25 \cdot 180,5 \cdot 0,9} = 0,089.$$

Коефіцієнт K_1 :

$$K_1 = \frac{1 - \vartheta_2^2}{\left(\frac{1}{3} + \vartheta_1 \cdot \vartheta_2\right) + \sqrt{\left(\frac{1}{2} + \vartheta_1 \cdot \vartheta_2\right)^2 + (1 - \vartheta_2^2) \cdot \vartheta_1^2}} = \frac{1 - 0,09^2}{\left(\frac{1}{3} + 0,3 \cdot 0,09\right) + \sqrt{\left(\frac{1}{2} + 0,3 \cdot 0,09\right)^2 + (1 - 0,09^2) \cdot 0,3^2}} = 1,03.$$

Граничне напруження вигину в місці кріплення опор $[\sigma_i]$, МПа

$$[\sigma_i] = K_1 \cdot K_2 \cdot [\sigma] = 1,03 \cdot 1,25 \cdot 180,6 = 232.$$

Допустиме зусилля на опорну лапу $[F]_1$, МПа

$$[F]_1 = \frac{[\sigma_i] h_1 (S-C)^2}{K_7 e_{1e}} = \frac{232 \cdot 0,3 \cdot (0,004 - 0,002)^2}{0,466 \cdot 0,125} = 4,78 \cdot 10^{-3}.$$

Несуча здатність обичайки в місці приварювання опорної лапи без підкладного листа.

$$F_1 \leq [F]_1$$

$$3 \cdot 10^{-3} \leq 4,78 \cdot 10^{-3}.$$

Умова виконується.

5.7 Розрахунок трубних решіток на міцність

Розрахунок трубних решіток виконується для забезпечення надійності, міцності та ефективності роботи теплообмінного обладнання. Основна ціль розрахунку трубних решіток забезпечення міцності конструкції. Трубні решітки закріплюють теплообмінні труби та підтримують високий тиск і температурні навантаження. Розрахунок необхідний для вибору оптимальної товщини та матеріалу, щоб запобігти деформації або руйнуванню під дією експлуатаційних умов.

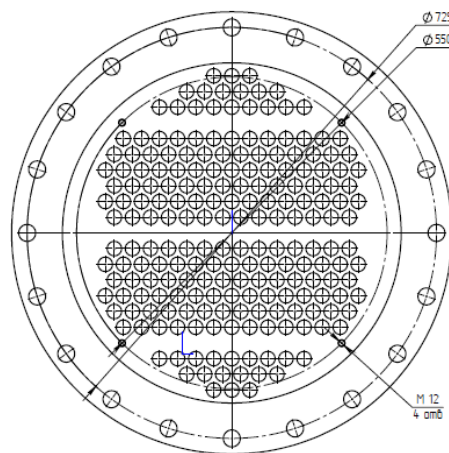


Рисунок 5.7 – Схема розміщення труб в трубній решітці

Вихідні дані:

Внутрішній діаметр обичайки, м, D 0,6;

Розрахунковий тиск, МПа, P_M 0,12;

Розрахункова температура, К, t 85.

Розрахунок буде проводитися за алгоритмом, запропонованим авторами [35].

Коефіцієнт ослаблення решітки отворами φ_0

$$\varphi_0 = \frac{D - d_0}{D} = \frac{0,6 - 0,528}{0,6} = 0,12$$

Початкова товщина трубної решітки S_p ,

$$S_p = 0,5D \sqrt{\frac{p_p}{\sigma_p \varphi_0}} = 0,5 \cdot 0,6 \sqrt{\frac{0,12}{180,5 \cdot 0,12}} = 0,022 \text{ м}$$

Приймаємо $S_p = 0,025$ м.

Коефіцієнт впливу тиску на трубну решітку з боку міжтрубного простору η_M

$$\eta_M = 1 - \frac{n \cdot d_T^2}{4a_1^2} = 1 - \frac{206 \cdot 0,025^2}{4 \cdot 0,276^2} = 0,579$$

Коефіцієнт впливу тиску на трубну решітку з боку трубного простору η_T

$$\eta_T = 1 - \frac{n(d_T - 2S_T)^2}{4a_1^2} = 1 - \frac{206 \cdot (0,025 - 2 \cdot 0,002)^2}{4 \cdot 0,2765^2} = 0,703$$

Модуль пружності основи (системи труб) K_y ,

$$K_y = \frac{E_T(\eta_T - \eta_M)}{l} = \frac{2,014 \cdot 10^5 \cdot (0,703 - 0,579)}{6} = 4,16 \cdot 10^4 \frac{\text{МН}}{\text{м}^3}$$

Коефіцієнт зміни жорсткості системи труби-кожух при дії тиску K_p

Коефіцієнт впливу тиску на поздовжню деформацію труб m_{cp}

$$m_{cp} = 0,15 \cdot \frac{n \cdot (d_T - S_T)^2}{a_1^2} = 0,15 \cdot \frac{206 \cdot (0,025 - 0,002)^2}{0,2765^2} = 0,214$$

Відносна характеристика безтрубного краю трубної решітки m_n

$$m_n = \frac{a}{a_1} = \frac{0,3}{0,2765} = 1,085$$

Зведене відношення жорсткості труб до жорсткості кожуха ρ

$$\rho = \frac{K_y a_1 l}{E_K S_K} = \frac{4,160 \cdot 10^4 \cdot 0,2765 \cdot 6}{1,925 \cdot 10^5 \cdot 0,006} = 5,976$$

Зведений тиск на решітку p_0

$$\rho_0 = [a_K(t_K - t_0)] - a_T(t_T - t_0)K_y l + [\eta_T - 1 + m_{cp} + m_n(m_n + 0,5\rho K_q)]\rho_T - [\eta_M - 1 + m_{cp} + m_n(m_n + 0,3\rho K_p)]\rho_M = 1,706 \text{ МПа}$$

Коефіцієнт жорсткості перфорованої плити ψ_0 :

$$\psi_0 = 0,44$$

Коефіцієнт системи решітка – труби β

$$\beta = \frac{1,82}{S_p} \left(\frac{K_y S_p}{\psi_0 E_p} \right)^{0,25} = \frac{1,82}{0,025} \cdot \left(\frac{4,16 \cdot 10^4 \cdot 0,025}{0,44 \cdot 2,014 \cdot 10^5} \right)^{0,25} = 13,475 \frac{1}{\text{м}}$$

Коефіцієнт системи кожух – решітка β_1

$$\beta_1 = \frac{1,3}{\sqrt{aS_1}} = \frac{1,3}{\sqrt{0,3 \cdot 0,006}} = 30,64 \frac{1}{\text{м}}$$

Коефіцієнт системи обичайка – фланець камери β_2

$$\beta_2 = \frac{1,3}{\sqrt{aS_2}} = \frac{1,3}{\sqrt{0,3 \cdot 0,006}} = 30,64 \frac{1}{\text{м}}$$

Коефіцієнт K_1

$$K_1 = \frac{\beta_1 a E_K S_1^3}{5,5 R_1} = \frac{30,64 \cdot 0,3 \cdot 1,925 \cdot 10^5 \cdot 0,006^3}{5,5 \cdot 0,345} = 0,201 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Коефіцієнт K_2

$$K_2 = \frac{\beta_2 a E_D S_2^3}{5,5 R_2} = \frac{30,64 \cdot 0,3 \cdot 2,014 \cdot 10^5 \cdot 0,006^3}{5,5 \cdot 0,345} = 0,211 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Коефіцієнт жорсткості фланця кожуха при вигині $K_{\phi 1}$

$$\begin{aligned} K_{f1} &= \frac{E_1 b_1 h_1^3}{12 R_1^2} + K_1 \left(1 + \frac{\beta_1 h_1}{2} \right) \\ &= \frac{2,064 \cdot 10^5 \cdot 0,025^3 \cdot 0,01}{12 \cdot 0,345^2} + 0,201 \left(1 + \frac{30,64 \cdot 0,025}{2} \right) \\ &= 0,482 \text{ Н} \cdot \text{м} \end{aligned}$$

Коефіцієнт жорсткості фланця кожуха при вигині $K_{\phi 2}$

$$\begin{aligned} K_{f2} &= \frac{E_2 b_2 h_2^3}{12 R_2^2} + K_2 \left(1 + \frac{\beta_2 h_2}{2} \right) \\ &= \frac{2,064 \cdot 10^5 \cdot 0,01^3 \cdot 0,025}{12 \cdot 0,345^2} + 0,210 \left(1 + \frac{30,64 \cdot 0,025}{2} \right) \\ &= 0,495 \text{ Н} \cdot \text{м} \end{aligned}$$

Коефіцієнт жорсткості фланцевого з'єднання при вигині K_{ϕ} ,

$$K_f = K_{f1} + K_{f2} = 0,482 + 0,495 = 0,977 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Коефіцієнт впливу тиску на вигин 1-го та 2-го фланців:

$$m_1 = m_2 = \frac{1 + \beta_1 h_1}{2 \beta_1^2} = \frac{1 + 30,64 \cdot 0,025}{2 \cdot 30,64^2} = 9,4 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$$

Зведений тиск на фланці p_1

$$p_1 = \frac{K_y}{\beta K_f} (m_1 p_M - m_2 p_T) = \frac{4,16 \cdot 10^4}{13,47 \cdot 0,97} (9,4 \cdot 10^{-4} \cdot 0,12 - 9,4 \cdot 10^{-4} \cdot 0,1) \\ = 5,95 \cdot 10^{-3} \text{ МПа}$$

Зведене відношення жорсткості труб до жорсткості фланцевого з'єднання ρ_1

$$\rho_1 = \frac{K_y a a_1}{\beta^2 K_f R_1} = \frac{4,16 \cdot 10^4 \cdot 0,3 \cdot 0,2765}{13,48^2 \cdot 0,97 \cdot 0,345} = 5,64$$

Безрозмірний параметр системи решітка – труби ω

$$\omega = \beta a_1 = 13,48 \cdot 0,276 = 3,7$$

Коефіцієнти, що враховують підтримуючий вплив труб Φ_1, Φ_2, Φ_3

Коефіцієнти Φ_1, Φ_2, Φ_3 визначаються за таблицею В1 Додатка В [8] залежно від безрозмірного параметра системи решітка – труби ω

$$\Phi_1 = 5,75$$

$$\Phi_2 = 3,883$$

$$\Phi_3 = 5,66$$

Безрозмірний параметр t

$$t = 1 + 1,4\omega(m_n - 1) = 1 + 1,4 \cdot 3,72 \cdot (1,08 - 1) = 1,443$$

Коефіцієнт T_1

$$T_1 = \Phi_1 \cdot [m_n + 0,5(1 + m_n t)(t - 1)] \\ = 5,75 \cdot [1,08 + 0,5 \cdot (1 + 1,085 \cdot 1,443)(1,44 - 1)] = 9,51$$

Коефіцієнт T_2

$$T_2 = \Phi_2 t = 3,83 \cdot 1,44 = 5,53$$

Коефіцієнт T_3

$$T_3 = \Phi_3 m_n = 5,66 \cdot 1,08 = 6,14$$

Розподілена по краю трубної решітки сила, що перерізує Q_{Π}

$$Q_n = a_1 \frac{p_0(T_3 + p_1) - p_1 T_2}{(T_1 + \rho K_q)(T_3 + p_1) - T_2^2} \\ = 0,2765 \cdot \frac{1,706 \cdot (6,14 + 5,64) - 0,006 \cdot 5,52}{(9,51 + 5,97) \cdot (6,14 + 5,64) - 5,52^2} = 0,366 \frac{\text{МН}}{\text{м}}$$

Розподілена по периметру перфорованої зони решітки сила, що перерізує Q_a

$$Q_a = m_n Q_n = 1,08 \cdot 0,366 = 0,397 \frac{\text{МН}}{\text{м}}$$

Дотичні напруження в трубній решітці в місці з'єднання з кожухом τ_{p1}

$$\tau_{p1} = \frac{|Q_n|}{S_{1p} - C_1} = \frac{|0,366|}{0,025 - 0,002} = 15,91 \text{ МПа}$$

Коефіцієнт ослаблення решітки φ_p

$$\varphi_p = 1 - \frac{d_0}{t_p} = 1 - \frac{0,025}{0,032} = 0,219$$

Дотичні напруження в перфорованій частині трубної решітки τ_{p2}

$$\tau_{p2} = \frac{|Q_a|}{\varphi_p (S_p - C_1)} = \frac{|0,397|}{0,218 \cdot (0,025 - 0,002)} = 78,9 \text{ МПа}$$

Перевірка статичної міцності трубної решітки

$$\max\{\tau_{p1} | \tau_{p2}\} \leq 0,8 \sigma_p$$

$$\max\{15,91 | 78,9\} = 0,8 \cdot 180,6 \text{ МПа}$$

$$0,8 \sigma_p = 0,8 \cdot 180,6 = 144,5 \text{ МПа}$$

$$78,9 \text{ МПа} < 144,5 \text{ МПа}$$

Висновок: умова статичної міцності виконується.

5.8 Розрахунок труб на міцність, стійкість і жорсткість труб у решітці

Метою розрахунку є перевірка труб на міцність стійкість та жорсткість.

Розрахункова схема до розрахунку труб наведена на рисунку 5.8.

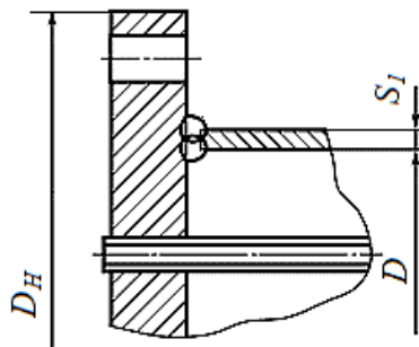


Рисунок 5.8 – Таврове зварювання решітки з обичайкою кожуха

Вихідні дані:

Відстань від осі кожуха до осі найбільш віддаленої труби, м, a_1 0,3;

Розрахунковий тиск, МПа, P_M 0,12;

Коефіцієнт системи решітка - труби β 13,475

Зведене відношення жорсткості труб до жорсткості фланцевого з'єднання, ρ_1

Розрахунок буде проводитися за алгоритмом, запропонованим авторами [36].

Згинальний момент, розподілений по периметру трубної решітки, $\frac{МН \cdot м}{м}$:

$$M_{\Pi} = \frac{a_1}{\beta} \cdot \frac{p_1 \cdot (T_1 + \rho \cdot K_q) - p_0 \cdot T_2}{(T_1 + \rho \cdot K_q) \cdot (T_3 + \rho_1) - T_2^2} \quad (5.4)$$

Згинальний момент, розподіленої по периметру перфорованої частини трубної решітки, $\frac{МН \cdot м}{м}$:

$$M_a = M_{\Pi} + (a - a_1) \cdot Q_{\Pi} \quad (5.5)$$

Осьова сила, яка діє на трубу, МН:

$$N_T = \frac{\pi \cdot a_1}{i} \cdot [(\eta_M \cdot \rho_M - \eta_T \cdot \rho_T) \cdot a_1 + \Phi_1 \cdot Q_a + \Phi_2 \cdot \beta \cdot M_a] \quad (5.6)$$

Мембранне напруження в трубах в осьовому напрямку, МПа:

$$\sigma_{1T} = \frac{|N_T|}{\pi \cdot (d_T - S_T) \cdot S_T} \quad (5.7)$$

Мембранне напруження в трубах в окружному напрямку, МПа:

$$\sigma_{2T} = \frac{(d_T - S_T) \cdot \max\{|p_T|; |p_M|; |p_T - p_M|\}}{2 \cdot S_T} \quad (5.8)$$

Умова статичної міцності труб, МПа:

$$\max(\sigma_{1T}; \sigma_{2T}) \leq [\sigma] \quad (5.9)$$

Алгоритмічну схему комп'ютерного розрахунку умови статичної міцності труб наведено на рисунку Б.1. Перелік усіх використаних ідентифікаторів для цього розрахунку подано в таблиці Б.1. Крім того, розроблено алгоритм розрахунку з використанням програми Mathcad, який наведено в Додатку Б.

Висновок: за результатами розрахунку умова статичної міцності труб виконується.

5.9 Розрахунок напружень з урахуванням крайових навантажень

Розглянемо вузол з'єднання циліндричної обичайки і еліптичного днища, які знаходяться під дією внутрішнього тиску. Умовно розсічемо вузол площиною, нормальною до осі симетрії оболонки. Статично визначена система, яка утворюється внаслідок цього складається з двох оболонок.

До оболонок прикладається зовнішнє навантаження (внутрішній тиск p), а також невідомі крайові навантаження Q_o і M_o , які треба знайти. Умовно приймаються для краю оболонки додатними радіальні деформації Δ_i , які діють у напрямку від її осі, а кутові деформації Θ_i – у напрямку за годинниковою стрілкою.

Отримаємо для правої частини розрахункової схеми рівняння сумісності радіальних і кутових деформацій:

$$\begin{cases} \Delta_p^u + \Delta_{p2}^u - \Delta_{O_o}^u + \Delta_{M_o}^u = \Delta_p^d + \Delta_{Q_o}^d + \Delta_{M_o}^d \\ \theta_p^u + \theta_{p2}^u - \theta_{O_o}^u + \theta_{M_o}^u = -\theta_p^d - \theta_{Q_o}^d - \theta_{M_o}^d \end{cases} \quad (5.10)$$

де $\Delta_p^u, \Delta_{O_o}^u, \Delta_{M_o}^u, \Delta_{p2}^u$ радіальні деформації краю вертикальної циліндричної обичайки під дією навантажень; $\Delta_p^d, \Delta_{O_o}^d, \Delta_{M_o}^d$ радіальні деформації краю днища під дією навантажень;

$\theta_p^u, \theta_{p2}^u, \theta_{O_o}^u, \theta_{M_o}^u$ кутові деформації краю вертикальної циліндричної обичайки під дією навантажень; $\theta_p^d, \theta_{O_o}^d, \theta_{M_o}^d$ кутові деформації краю днища під дією навантажень.

Навантаження днища та вертикальної циліндричної обичайки зображено на рисунках 5.9, 5.10.

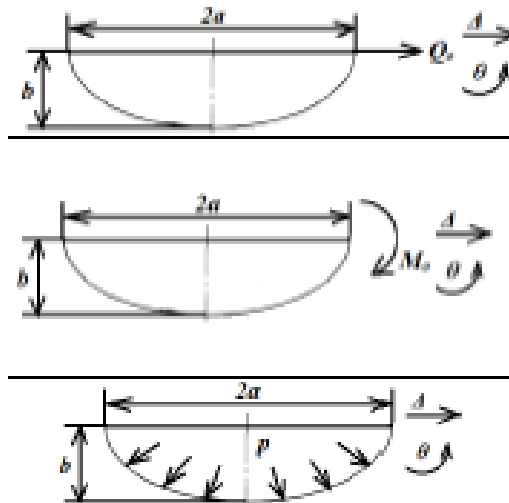


Рисунок 5.9 – Крайові навантаження днища

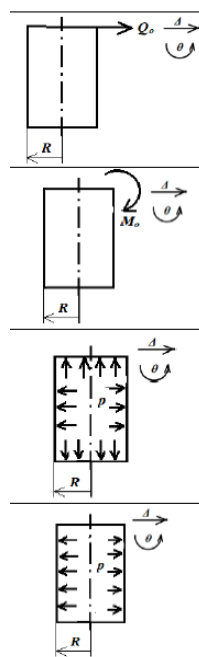


Рисунок 5.10 – Крайові навантаження обичайки

Вихідні дані:

Внутрішній діаметр обичайки, м, D 0,6;

Розрахунковий тиск, МПа, P_M 0,12;

Температура, °C, t 85.

Допустиме напруження матеріалу обичайки за розрахункової температури $t = 55$ °C для сталі 16ГС, $[\sigma]$, МПа 180,6;

Коефіцієнт Пуассона, μ для сталі 16ГС 0,3.

Розрахунок буде проводитися за алгоритмом, запропонованим авторами [34].

Вирішивши рівняння 5.10 отримаємо такі результати: $Q_o=0,111$, $M_o=0,03$
Розрахунок деформації на краю вертикальної циліндричної обичайки.
радіальна деформація:

$$\beta = \frac{\sqrt[4]{3 \cdot (1 - \mu^2)}}{\sqrt{R \cdot (S - C)}} = \frac{\sqrt[4]{3 \cdot (1 - 0,3^2)}}{\sqrt{0,3 \cdot (0,006 - 0,0022)}} = 38,07 \text{ МПа}$$

$$\Delta_{Q_o}^{\text{ц}} = \frac{2 \cdot \beta \cdot R^2 \cdot Q_o}{E \cdot (S - C)} = \frac{2 \cdot 38,07 \cdot 0,3^2 \cdot 0,111}{1,98 \cdot 10^5 \cdot (0,006 - 0,0022)} = 1,01 \cdot 10^{-3} \text{ МПа}$$

$$\Delta_{M_o}^{\text{ц}} = \frac{2 \cdot \beta^2 \cdot R^2 \cdot M_o}{E \cdot (S - C)} = \frac{2 \cdot 38,07^2 \cdot 0,3^2 \cdot 0,03}{1,98 \cdot 10^5 \cdot (0,006 - 0,0022)} = 1 \cdot 10^{-2} \text{ МПа}$$

$$\Delta_{p1}^{\text{ц}} = \frac{(2 - \mu) \cdot R^2 \cdot p}{2E \cdot (S - C)^3} = \frac{(2 - 0,3) \cdot 0,3^2 \cdot 0,12}{2 \cdot 1,98 \cdot 10^5 \cdot (0,006 - 0,0022)^3} = 0,845 \text{ МПа}$$

$$\Delta_{p2}^{\text{ц}} = \frac{R^2 \cdot p}{E \cdot (S - C)^3} = \frac{0,3^2 \cdot 0,12}{1,98 \cdot 10^5 \cdot (0,006 - 0,0022)^3} = 0,994 \text{ МПа}$$

кутова деформація:

$$\theta_{Q_o}^{\text{ц}} = -\frac{2 \cdot R^2 \cdot \beta^2 \cdot Q_o}{E \cdot (S - C)} = \frac{2 \cdot 0,3^2 \cdot 38,07^2 \cdot 0,111}{1,98 \cdot 10^5 \cdot (0,006 - 0,0022)} = 0,038 \text{ МПа}$$

$$\theta_{M_o}^{\text{ц}} = \frac{4 \cdot R^2 \cdot \beta^3 \cdot M_o}{E \cdot (S - C)} = \frac{4 \cdot 0,3^2 \cdot 38,07^3 \cdot 0,03}{1,98 \cdot 10^5 \cdot (0,006 - 0,0022)} = 0,79 \text{ МПа}$$

$$\theta_{p1}^{\text{ц}} = 0 \text{ МПа}$$

$$\theta_{p2}^{\text{ц}} = 0 \text{ МПа}$$

Розрахунок напруження на краю вертикальної обичайки.

меридіанне напруження:

$$\sigma_{t_{Q_o}}^{\text{ц}} = 0 = 0 \text{ МПа}$$

$$\sigma_{t_{M_o}}^{\text{ц}} = \frac{6 \cdot M_o}{(S - C)^2} = \frac{6 \cdot 0,025}{(0,006 - 0,0022)^2} = 104 \text{ МПа}$$

$$\sigma_{t_{p1}}^{\text{ц}} = \frac{p \cdot R}{2 \cdot (S - C)} = \frac{0,03 \cdot 0,1625}{2 \cdot (0,006 - 0,0022)} = 0,641 \text{ МПа}$$

$$\sigma_{t_{p2}}^{\text{ц}} = 0 \text{ МПа}$$

кільцеве напруження:

ЛН21.01.101.001 ПЗ	Інд. змін.	Дата видання	Мова UA	Аркуш 79
--------------------	------------	--------------	------------	-------------

$$\sigma_{r_{Q_o}}^{\text{н}} = \frac{2 \cdot \beta \cdot R \cdot Q_o}{(S - C)} = \frac{2 \cdot 38,07 \cdot 0,3 \cdot 0,111}{(0,006 - 0,0022)} = 66,7 \text{ МПа}$$

$$\sigma_{r_{M_o}}^{\text{н}} = \frac{2 \cdot \beta^2 \cdot R \cdot M_o}{(S - C)} + \frac{6 \cdot \mu \cdot M_o}{(S - C)^2} = \frac{2 \cdot 38,07^2 \cdot 0,3 \cdot 0,03}{(0,006 - 0,0022)} + \frac{6 \cdot 0,3 \cdot 0,03}{(0,006 - 0,0022)^2} = 64,9 \text{ МПа}$$

$$\sigma_{r_{p1}}^{\text{н}} = \frac{p \cdot R}{(S - C)} = \frac{0,12 \cdot 0,3}{(0,006 - 0,0022)} = 9,5 \text{ МПа}$$

$$\sigma_{r_{p2}}^{\text{н}} = \frac{p \cdot R}{(S - C)} = \frac{0,12 \cdot 0,3}{(0,006 - 0,0022)} = 9,5 \text{ МПа}$$

Розрахунок деформації на краю днища

$$\beta_3 = \frac{\sqrt[4]{3 \cdot (1 - \mu^2)}}{\sqrt{a \cdot (S_3 - C)}} = \frac{\sqrt[4]{3 \cdot (1 - 0,3^2)}}{\sqrt{0,1625 \cdot (0,006 - 0,0022)}} = 51,72 \text{ МПа}$$

Радіальна деформація днища:

$$\Delta_{Q_o}^{\text{д}} = \frac{2 \cdot \beta_3 \cdot a^2 \cdot Q_o}{E \cdot (S_3 - C)} = \frac{2 \cdot 38,07 \cdot 0,3^2 \cdot 0,111}{1,98 \cdot 10^5 \cdot (0,006 - 0,0022)} = 1 \cdot 10^{-2} \text{ МПа}$$

$$\Delta_{M_o}^{\text{д}} = \frac{2 \cdot \beta_3^2 \cdot a^2 \cdot M_o}{E \cdot (S_3 - C)} = \frac{2 \cdot 38,07^2 \cdot 0,3^2 \cdot 0,03}{1,98 \cdot 10^5 \cdot (0,006 - 0,0022)} = 0,104 \text{ МПа}$$

$$\Delta_p^{\text{д}} = \frac{(2 - \mu - \frac{a^2}{b^2}) \cdot a^2 \cdot p}{2 \cdot E \cdot (S_3 - C)} = \frac{(2 - 0,3 - \frac{0,3^2}{0,1^2}) \cdot 0,3^2 \cdot 0,12}{2 \cdot 1,98 \cdot 10^5 \cdot (0,006 - 0,0022)} = 5,24 \cdot 10^{-7} \text{ МПа}$$

Кутова деформація днища:

$$\theta_{Q_o}^{\text{д}} = \frac{2 \cdot \beta_3^2 \cdot a^2 \cdot Q_o}{E \cdot (S_3 - C)} = \frac{2 \cdot 38,07^2 \cdot 0,3^2 \cdot 0,111}{1,98 \cdot 10^5 \cdot (0,006 - 0,0022)} = 0,038 \text{ МПа}$$

$$\theta_{M_o}^{\text{д}} = \frac{4 \cdot \beta_3^3 \cdot a^2 \cdot M_o}{E \cdot (S_3 - C)} = \frac{4 \cdot 38,07^3 \cdot 0,3^2 \cdot 0,03}{1,948 \cdot 10^5 \cdot (0,006 - 0,0022)} = 0,792 \text{ МПа}$$

$$\theta_p^{\text{д}} = 0 \text{ МПа}$$

Розрахунок напруження на краю днища.

Меридіанне напруження:

$$\sigma_{m_{Q_o}}^{\text{д}} = 0 \text{ МПа}$$

$$\sigma_{m_{M_o}}^{\text{д}} = \frac{6 \cdot M_o}{(S_3 - C)^2} = \frac{6 \cdot 0,03}{(0,006 - 0,0022)^2} = 124,6 \text{ МПа}$$

$$\sigma_{mop}^d = \frac{p \cdot a}{2 \cdot (S_3 - C)^2} = \frac{0,12 \cdot 0,3}{2 \cdot (0,006 - 0,0022)^2} = 4,73 \text{ МПа}$$

Кільцеве напруження

$$\sigma_{toQ_o}^d = \frac{2 \cdot \beta_3 \cdot a \cdot Q_o}{(S_3 - C)} = \frac{2 \cdot 38,07 \cdot 0,3 \cdot 0,111}{(0,006 - 0,0022)} = 33,36 \text{ МПа}$$

$$\sigma_{toM_o}^d = \frac{2 \cdot \beta_3^2 \cdot a \cdot M_o}{(S_3 - C)} + \frac{6 \cdot \mu \cdot M_o}{(S_3 - C)^2} = \frac{2 \cdot 38,07^2 \cdot 0,3 \cdot 0,03}{(0,006 - 0,0022)} + \frac{6 \cdot 0,3 \cdot 0,03}{(0,006 - 0,0022)^2} = 121,9 \text{ МПа}$$

$$\sigma_{top}^d = \frac{p \cdot a \cdot (2 - \frac{a^2}{b^2})}{2 \cdot (S_3 - C)} = \frac{0,3 \cdot 0,12 \cdot (2 - \frac{0,3^2}{0,1^2})}{2 \cdot (0,006 - 0,0022)} = 33,16 \text{ МПа}$$

Сумарні меридіанні напруження на краю днища.

$$\sigma_{mд} = \sigma_{moQ_o}^d + \sigma_{moM_o}^d + \sigma_{mop}^d = 0 + 124,65 + 4,74 = 130 \text{ МПа}$$

Сумарні кільцеві напруження на краю днища.

$$\sigma_{тд} = \sigma_{toQ_o}^d + \sigma_{toM_o}^d + \sigma_{top}^d = 33,36 + 121,9 + 33,15 = 188,4 \text{ МПа}$$

Сумарні кільцеві напруження на краю вертикальної обичайки.

$$\sigma_{тц} = \sigma_{toQ_o}^u + \sigma_{toM_o}^u + \sigma_{top}^u + \sigma_{top2}^u = 0 + 124,65 + 4,73 + 0 = 129,4 \text{ МПа}$$

Сумарні меридіанні напруження на краю вертикальної обичайки.

$$\sigma_{rц} = \sigma_{roQ_o}^u + \sigma_{roM_o}^u + \sigma_{rop}^u + \sigma_{rop2}^u = 66,72 + 64,91 + 9,47 + 9,47 = 150,6 \text{ МПа.}$$

Максимальні напруження на краю еліптичного днища:

$$\sigma_{maxд} = \max\{\sigma_{mд}; \sigma_{тд}\} = \max\{129,4; 188,4\} = 188,4 \text{ МПа}$$

Максимальні напруження на краю циліндричної обичайки:

$$\sigma_{maxo} = \max\{\sigma_{тц}; \sigma_{rц}\} = \max\{129,4; 150,6\} = 150,6 \text{ МПа}$$

Допустиме напруження для крайових зон для пластичних матеріалів при наявності статичних навантажень і коли мають перевагу напруження вигину:

$$[\sigma]_{кр} = 1,3[\sigma] = 1,3 \cdot 180,6 = 234,8 \text{ МПа}$$

Умова міцності:

$$\sigma_{maxo} \leq [\sigma]_{кр} \cdot \varphi,$$

$$\sigma_{max_d} \leq [\sigma]_{кр} \cdot \varphi,$$

$$[\sigma]_{кр} \cdot \varphi = 234,8 \cdot 0,9 = 192,2 \text{ МПа}$$

$$188,4 \leq 192,2 \text{ МПа}$$

$$150,6 \leq 192,2 \text{ МПа}$$

Висновок: умова міцності виконується.

6 Рекомендації з монтажу та експлуатації апарата

Дефлегматор є одним із основних теплообмінних апаратів установки алкілювання бензолу, який забезпечує часткову конденсацію парової суміші та повернення частини конденсату у верхню частину ректифікаційної колони як флегми. Надійність роботи дефлегматора безпосередньо впливає на ефективність розділення компонентів, якість готової продукції та безпеку технологічного процесу.

Під час експлуатації дефлегматора можливе утворення відкладень на поверхні теплообміну, що призводить до зменшення коефіцієнта теплопередачі, підвищення гідравлічного опору та погіршення технологічних показників роботи установки. Тому важливим заходом забезпечення безпечної та ефективної роботи обладнання є своєчасне проведення профілактичних оглядів, очищення та технічного обслуговування.

Очищення теплообмінних поверхонь здійснюється механічним, хімічним або комбінованим способом залежно від характеру забруднень. При незначних відкладеннях застосовується хімічне промивання спеціальними мийними розчинами, а при значному засміченні трубного простору використовується механічне очищення після повного виведення апарата з експлуатації. Перед проведенням ремонтних робіт дефлегматор повинен бути відключений від технологічної схеми, спорожнений, продмуханий інертним газом та провентильований до досягнення безпечних концентрацій шкідливих речовин.

Технічне обслуговування дефлегматора виконується відповідно до вимог НПАОП 0.00-1.69-13 «Правила охорони праці під час експлуатації тепломеханічного обладнання» [37]. Згідно з нормативними вимогами необхідно регулярно контролювати стан трубного пучка, трубних решіток, корпусу апарата, ущільнень фланцевих з'єднань, запірної арматури та контрольно-вимірювальних приладів. Результати оглядів і ремонтів заносяться до експлуатаційного журналу обладнання.

Особлива увага приділяється контролю герметичності дефлегматора, оскільки технологічний процес алкілування бензолу пов'язаний з використанням токсичних та пожежонебезпечних речовин. Бензол належить до речовин другого класу небезпеки та чинить токсичну дію на центральну нервову систему, органи кровотворення та дихання. Тривалий вплив парів бензолу може викликати хронічні професійні захворювання, тому навіть незначні витoki повинні негайно усуватися.

Для виявлення витоків застосовуються газоаналізатори безперервної дії, які забезпечують контроль концентрації бензолу в повітрі робочої зони. Контроль проводиться відповідно до вимог санітарного законодавства України. При перевищенні встановлених гранично допустимих концентрацій персонал зобов'язаний припинити роботи, повідомити відповідальних осіб та вжити заходів щодо локалізації аварійної ситуації.

З метою попередження аварійних ситуацій дефлегматор обладнується контрольно-вимірювальними приладами для безперервного контролю температури, тиску та витрати теплоносія. Для запобігання руйнуванню апарата внаслідок перевищення допустимого тиску передбачаються запобіжні клапани, які проходять періодичну перевірку та налаштування відповідно до вимог чинних нормативних документів.

Під час виконання ремонтних робіт особливу небезпеку становлять газонебезпечні роботи всередині апаратів та замкнених просторів. Такі роботи дозволяється виконувати лише за нарядом-допуском після проведення аналізу повітряного середовища. Концентрація вибухонебезпечних та токсичних речовин повинна відповідати вимогам безпечного виконання робіт. Працівники повинні бути забезпечені засобами індивідуального захисту та постійним наглядом відповідальної особи.

До обслуговування дефлегматора допускаються особи віком не менше 18 років, які пройшли медичний огляд, професійну підготовку, вступний та первинний інструктажі з охорони праці, а також перевірку знань з безпечних

методів роботи. Періодичне навчання та перевірка знань проводяться згідно з НПАОП 0.00-4.12-05 [38].

Працівники повинні використовувати відповідні засоби індивідуального захисту. Для захисту органів дихання застосовуються фільтрувальні протигази марки А або АВЕК, а за високих концентрацій шкідливих речовин – ізолюючі дихальні апарати. Для захисту очей використовуються захисні окуляри закритого типу відповідно до ДСТУ EN 166:2017 [39]. Захист рук забезпечується хімічно стійкими рукавицями, а для захисту тіла застосовується спеціальний антистатичний спецодяг та спецвзуття.

Оскільки бензол належить до легкозаймистих рідин, особливе значення має забезпечення пожежної безпеки. Виробничі приміщення обладнуються припливно-витяжною вентиляцією, системами автоматичної пожежної сигналізації та первинними засобами пожежогасіння. Електрообладнання, що експлуатується в зоні можливого утворення вибухонебезпечних сумішей, повинно відповідати вимогам вибухозахисту.

Для зниження ризику виникнення статичної електрики всі металеві частини технологічного обладнання, трубопроводів та арматури підлягають обов'язковому заземленню. Стан заземлювальних пристроїв перевіряється відповідно до графіка планово-попереджувальних робіт.

Важливим елементом забезпечення безпеки є виробничий контроль параметрів мікроклімату. Температура, відносна вологість та швидкість руху повітря повинні відповідати вимогам ДСН 3.3.6.042-99 [40]. Для створення безпечних умов праці виробничі приміщення обладнуються системами опалення, вентиляції та кондиціонування повітря.

7 Рівень стандартизації та уніфікації

У розробленій конструкції дефлегматора рівень стандартизації є достатньо високим, оскільки більшість елементів апарата виконано із застосуванням типових і уніфікованих рішень. До таких елементів належать:

- кожух стандартного діаметра;
- трубний пучок із типовими діаметрами труб (19, 25 мм);
- трубні решітки стандартної конструкції;
- фланцеві з'єднання, ущільнення, болтові з'єднання;
- перегородки (бафли), виконані за типовими схемами (сегментні або диско-кільцеві).

Уніфікація конструкції полягає у використанні однотипних вузлів і деталей, що повторюються в різних апаратах. Це дозволяє зменшити номенклатуру деталей, спростити виготовлення та ремонт, а також забезпечити взаємозамінність елементів. Зокрема, використання стандартних труб, фланців і кріпильних елементів значно полегшує обслуговування та знижує витрати на експлуатацію.

Важливим аспектом є також стандартизація геометричних параметрів теплообмінників, таких як діаметр кожуха, крок труб, товщина стінок та типи перегородок [41].

Рівень стандартизації розробленого дефлегматора можна оцінити як високий (близько 70–80%), оскільки основні конструктивні елементи виконані за типовими стандартами, а індивідуальні рішення застосовані лише для окремих вузлів, що визначають специфіку роботи апарата (зона конденсації, розподіл потоків, конструкція перегородок) [42].

Коефіцієнт стандартизації [43]:

$$K_c = \frac{n_c}{n_{\text{заг}}} = \frac{16}{19} = 0,842$$

де n_c кількість стандартних деталей, $n_c = 16$;

$n_{\text{заг}}$ - загальна кількість деталей, $n_{\text{заг}}=19$.

Коефіцієнт уніфікації визначаємо із залежності [43]:

$$K_y = \frac{n_c + n_{\text{ум}}}{n_{\text{заг}}} = \frac{16 + 2}{19} = 0,947$$

де $n_{\text{ум}}$ – кількість уніфікованих деталей, $n_{\text{ум}}=2$.

Розроблений підігрівач характеризується високим рівнем стандартизації та достатнім рівнем уніфікації. Це забезпечує технологічність виготовлення, зручність монтажу, можливість використання серійних комплектуючих і підвищує експлуатаційну надійність апарата. Одночасно збережено необхідний рівень індивідуалізації конструкції, що дозволяє адаптувати апарат до конкретних умов виробництва сірчаної кислоти.

Висновок: розраховано коефіцієнти стандартизації та уніфікації, які становлять: $K_c=0,842$; $K_y=0,947$.

8 Техніко-економічне обґрунтування модернізації

Модернізація дефлегматора установки алкілування бензолу.

Аналіз технічних та економічних показників роботи апарата показав, що його модернізація має значний потенціал для підвищення ефективності технологічного процесу та зниження експлуатаційних витрат.

Мета розрахунку полягає у техніко-економічному обґрунтуванні доцільності впровадження модернізації дефлегматора. Це дає змогу оцінити технічні переваги запропонованого рішення та визначити економічний ефект від його впровадження.

Для реалізації модернізації пропонується виконати мікроребрування внутрішньої поверхні теплообмінних труб дефлегматора. Наявність мікроребер сприяє інтенсифікації теплообміну за рахунок збільшення площі теплопередачі та підвищення турбулентності потоку робочого середовища. У результаті збільшується коефіцієнт теплопередачі, підвищується ефективність конденсації парів та зменшується необхідна поверхня теплообміну для забезпечення заданих технологічних параметрів.

Запропонована модернізація дозволяє підвищити продуктивність установки, зменшити енергетичні витрати на проведення процесу та забезпечити більш стабільний режим роботи обладнання. Крім того, інтенсифікація теплообміну сприяє підвищенню ступеня конденсації парів, що позитивно впливає на якість цільового продукту та ефективність розділення компонентів суміші.

Рівень удосконалення відповідає складності та обсягу проєкту. Виконання мікроребрування не потребує принципової зміни конструкції апарата та може бути реалізоване під час планового ремонту або реконструкції установки. Це дозволяє скоротити капітальні витрати порівняно з повною заміною дефлегматора на новий апарат.

Економічна доцільність модернізації обумовлена підвищенням ефективності теплопередачі, зменшенням витрат енергоресурсів та покращенням техніко-економічних показників виробництва. Розрахунок економічної ефективності включає визначення капітальних вкладень, експлуатаційних витрат та очікуваного економічного ефекту від впровадження запропонованого технічного рішення.

Економічно доцільно проводити модернізацію обладнання під час його капітального ремонту. Зазвичай вдосконалення устаткування в хімічній промисловості призводить до збільшення продуктивності на 10-18%, при цьому витрати на модернізацію не перевищують половини вартості нового обладнання з аналогічним призначенням [44].

Розрахунки ефективності на проведення модернізації устаткування полягають у визначенні коефіцієнта ефективності витрат, який розраховується за формулою (8.1):

$$n_{pi} = 1 - \frac{M_i + S_{ei}}{K_{Hi} \cdot \alpha \beta + S_{ai}} \quad (8.1)$$

де M_i – сукупні витрати на проведення модернізованого устаткування, грн;

S_{ei} – перевищення експлуатаційних витрат модернізованого устаткування порівняно з новим аналогічним устаткуванням, грн;

K_{Hi} – оптова ціна придбання нового аналогічного устаткування, грн.

α – коефіцієнт співвідношення продуктивності модернізованого устаткування та аналогічного нового устаткування;

β – коефіцієнт співвідношення тривалості ремонтного циклу модернізованого устаткування та аналогічного нового устаткування;

S_{ai} – втрати від недоамортизації устаткування, яке підлягає модернізації.

Техніко – економічні показники устаткування наведені у таблиці 8.1.

Таблиця 8.1. Техніко – економічні показники устаткування

Найменування показників	Одиниця виміру	Устаткування, яке підлягає модернізації	Нове аналогічне устаткування
1	2	3	4
Продуктивність	кг/с	3	4
Тривалість ремонтного циклу	хв	1080	768
Коефіцієнт теплопередачі	Вт/(м ² ·град)	405,6	405,6

Величини сукупних витрат на модернізацію устаткування може бути розраховано по формулі [44]:

$$M_i = \Phi_{i_{\text{перв}}}^{\text{мод}} \cdot K_i = 850000 \cdot 0,06 = 51000 \text{ грн}$$

де $\Phi_{i_{\text{перв}}}^{\text{мод}}$ – первісна (відновлена) вартість устаткування, яка підлягає модернізації, згідно даних підприємств, де експлуатується аналогічне обладнання, первісна вартість теплообмінного апарату.

K_i – коефіцієнт витрат, величина якого залежить від виду і типу устаткування, яка підлягає модернізації, в даному випадку $K_i = 0,06$ для теплообмінних апаратів.

Модернізоване устаткування у процесі подальшої експлуатації, як правило, вимагає більш високих експлуатаційних (поточних) витрат у порівнянні з аналогічним новим устаткуванням.

Експлуатаційні (поточні) витрати при роботі устаткування складаються з таких витрат:

- витрати паливно-мастильних матеріалів;
- витрати на придбання та виготовлення необхідних запасних частин;
- витрати на оплату праці ремонтного персоналу;
- інші поточні експлуатаційні витрати.

З достатнім для розрахунків ступенем точності, який базується на практичних даних підприємства хімічного машинобудування, величина

перевищення експлуатаційних (поточних) витрат по модернізованому устаткуванню порівняно з новим аналогічним S_{ei} може бути розрахована по формулі:

$$S_{ei} = q_{b_i} \cdot \Phi_{i_{\text{перв}}}^{\text{МОД}} - q_{b_H} \cdot \Phi_{i_{\text{перв}}}^{\text{НОВ}} = 0,12 \cdot 850000 - 0,1 \cdot 1000000 = 2000 \text{ грн},$$

де q_{b_i} – коефіцієнт експлуатаційних (поточних) витрат устаткування, яке підлягає модернізації, в даному випадку $q_{b_i} = 0,12$ – для теплообмінних апаратів [44, табл. 4].

$\Phi_{i_{\text{перв}}}^{\text{НОВ}}$ – первісна вартість нового (аналогічного) устаткування.

q_{b_H} – коефіцієнт експлуатаційних (поточних) витрат аналогічного нового устаткування, в даному випадку $q_{b_H} = 0,1$ для теплообмінних апаратів [44, табл. 4].

Коефіцієнт співвідношення тривалості ремонтного циклу модернізованого устаткування та аналогічного нового:

$$\beta = \frac{T_{\text{МОД}}}{T_{\text{НОВ}}} = \frac{60}{45} = 1,333,$$

де $T_{\text{МОД}}$ – тривалість ремонтного циклу устаткування, яке підлягає модернізації;

$T_{\text{НОВ}}$ – тривалість ремонтного циклу аналогічного нового устаткування.

Коефіцієнт співвідношення продуктивності вдосконаленого устаткування та аналогічного нового устаткування α розраховується по формулі [44]:

$$\alpha = \frac{P_i}{P_{\text{НОВ}}} = \frac{3}{4} = 0,75,$$

де $P_i = 3 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$ – продуктивність або інший один з найбільш важливих показників, який характеризує роботу устаткування, яке підлягає модернізації;

$P_{\text{НОВ}} = 4 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$ – продуктивність або інший один з найбільш важливих показників, який характеризує роботу аналогічного нового устаткування.

Значення коефіцієнту ефективності витрат n_{p_i} на модернізацію устаткування наведені в таблиці 8.2.

ЛН21.01.101.001 ПЗ	Інд. змін.	Дата видання	Мова UA	Аркуш 91
--------------------	------------	--------------	------------	-------------

Таблиця 8.2 – Значення коефіцієнту ефективності витрат n_{pi} на модернізацію устаткування.

Величина коефіцієнта n_{pi}	Висновок щодо доцільності модернізації устаткування
$n_{pi} > 0$	Модернізація устаткування з економічної точки зору доцільна
$n_{pi} < 0$	Модернізація устаткування з економічної точки зору недоцільна. Доцільним є придбання нового устаткування.
$n_{pi} = 0$	Рішення про модернізацію устаткування приймається, виходячи з конкретних виробничих обставин.

Коефіцієнт ефективності витрат за формулою (8.1):

$$n_{pi} = 1 - \frac{M_i + S_{ei}}{K_{Hi} \cdot \alpha\beta + S_{ai}} = 1 - \frac{51000 + 2000}{1200000 \cdot 0,75 \cdot 1,33 + 0} = 0,956$$

де $S_{ai} = 0$ – витрати від не до амортизації устаткування, яка підлягає модернізації;

K_{Hi} – оптова ціна придбання нового аналогічного устаткування, грн.

Висновок: оскільки $n_{pi} = 0,956 > 0$, то модернізація устаткування з економічної точки зору доцільна.

Висновки

У дипломному проєкті освітнього ступеня «бакалавр» на тему «Модернізація дефлегматора установки алкілування бензолу» виконано модернізацію дефлегматора, що є важливим елементом технологічної схеми виробництва етилбензолу методом алкілування бензолу. Запропоновані конструктивні зміни спрямовані на підвищення ефективності процесу конденсації парів, покращення тепло- та масообміну, зниження енергетичних витрат і забезпечення стабільної роботи технологічного обладнання.

Досягнення поставленої мети забезпечено шляхом удосконалення конструкції дефлегматора, оптимізації параметрів теплообмінної поверхні та режимів руху робочих середовищ. Запропоновані технічні рішення дозволяють підвищити інтенсивність теплопередачі, покращити якість розділення парорідинної суміші та підвищити експлуатаційну надійність апарата.

У процесі виконання дипломного проєкту проведено аналіз технології алкілування бензолу та визначено місце дефлегматора в загальній технологічній схемі виробництва. Обґрунтовано вибір конструкції модернізованого апарата, виконано патентний пошук і порівняльний аналіз сучасних технічних рішень у галузі тепло- та масообмінного обладнання.

Виконано комплекс інженерних розрахунків, що підтверджують працездатність, надійність і безпечність запропонованої конструкції. Проведено параметричний, гідравлічний розрахунки, а також розрахунки штуцерів, розрахунки на міцність обичайки, теплообмінних труб та днища, розрахунки опорних лап, та розрахунок напружень з урахуванням крайових навантажень.

Розроблено рекомендації щодо монтажу, технічного обслуговування та експлуатації обладнання. Проведено оцінку рівня стандартизації та уніфікації конструкції, виконано техніко-економічне обґрунтування модернізації, а також аналіз відповідності проєктних рішень вимогам охорони праці, промислової та пожежної безпеки.

Графічна частина проекту включає такі креслення як: технологічна схема – А1, дефлегматор складальний кресленик – А1, корпус складальний кресленик – А1, кресленик складальний опорної лапи – А3, розподільча камера складальний кресленик – А3, кришка складальний кресленик – А3, трубна решітка – А3 та відповідні специфікації до складальних креслень – А4, модернізація – А3, 3д модель апарата – А3.

Результати виконаної роботи свідчать про доцільність впровадження модернізованого дефлегматора у виробництво, оскільки запропоновані технічні рішення забезпечують підвищення ефективності технологічного процесу, покращення експлуатаційних характеристик обладнання та зниження витрат на його обслуговування.

Під час виконання дипломного проекту опубліковано дві тези доповідей у збірниках всеукраїнських науково-практичних конференцій студентів, аспірантів і молодих учених.

Conclusions

In the diploma project for the educational degree "Bachelor" on the topic "Modernization of the reflux condenser of the benzene alkylation unit", the reflux condenser, which is an important element of the technological scheme for the production of ethylbenzene by the alkylation of benzene, was modernized. The proposed design changes are aimed at increasing the efficiency of the vapor condensation process, improving heat and mass transfer, reducing energy costs and ensuring stable operation of the technological equipment.

The achievement of the set goal was ensured by improving the design of the reflux condenser, optimizing the parameters of the heat exchange surface and the modes of movement of the working media. The proposed technical solutions allow to increase the intensity of heat transfer, improve the quality of the separation of the vapor-liquid mixture and increase the operational reliability of the apparatus.

In the process of implementing the diploma project, an analysis of the benzene alkylation technology was carried out and the place of the reflux condenser in the general technological scheme of production was determined. The choice of the design of the modernized apparatus was justified, a patent search and comparative analysis of modern technical solutions in the field of heat and mass exchange equipment were performed.

A set of engineering calculations was performed, confirming the operability, reliability and safety of the proposed design. Parametric, hydraulic calculations were performed, as well as calculations of fittings, calculations for the strength of the shell, heat exchange pipes and bottom, calculations of support legs, and calculation of stresses taking into account edge loads.

Recommendations for installation, maintenance and operation of the equipment were developed. An assessment of the level of standardization and unification of the design was carried out, a feasibility study of the modernization was performed, as well

as an analysis of the compliance of design solutions with the requirements of labor protection, industrial and fire safety.

The graphic part of the project includes the following drawings: technological scheme - A1, reflux condenser assembly drawing - A1, housing assembly drawing - A1, support leg assembly drawing - A3, distribution chamber assembly drawing - A3, cover assembly drawing - A3, pipe grid - A3 and corresponding specifications for assembly drawings - A4, modernization - A3, 3D model of the apparatus - A3.

The results of the work performed indicate the feasibility of introducing the modernized reflux condenser into production, since the proposed technical solutions ensure increased efficiency of the technological process, improved operational characteristics of the equipment and reduced costs for its maintenance.

During the implementation of the diploma project, two abstracts of reports were published in the collections of all-Ukrainian scientific and practical conferences of students, postgraduates and young scientists.

ЛН21.01.101.001 ПЗ	Інд. змін.	Дата видання	Мова UA	Аркуш 96
--------------------	------------	--------------	------------	-------------

Перелік посилань

1. PCC Group Product Portal. Що таке бензол? Які властивості та застосування він має? [Електронний ресурс]. URL: <https://www.products.pcc.eu/uk/blog/що-таке-бензол-які-властивості-та-заст/> (дата звернення: 24.04.2026).
2. ВУЕ (Велика українська енциклопедія). Бензен [Електронний ресурс]. URL: <https://vue.gov.ua/Бензен> (дата звернення: 24.04.2026).
3. Коробчанський І.Є., Кузнєцов М.Д. Розрахунки апаратури для уловлювання хімічних продуктів коксування - М.: Металургія, 1972.
4. Технологічне обладнання для проведення процесів теплообміну при обробці сировини і напівфабрикатів. Головна | Elib LNTU. URL: https://elib.lntu.edu.ua/sites/default/files/elib_upload/Посіб%20Сай/page12.html (дата звернення: 24.04.2026).
5. Андреев, І. А. Конструювання і розрахунок кожухотрубних теплообмінників [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 133 «Галузеве машинобудування» / Ігор Андреев ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 5.28 Мбайт). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 140 с.
6. Теплообмінні апарати : навч. посіб. / уклад. О. М. [автор, якщо є]. – Миколаїв : НУК ім. адм. Макарова, 2023. – 228 с.
7. Швець Н. О. Підвищення ефективності компактних теплообмінників із оребреними трубками / Н. О. Швець — магист. дис. — Київ : КПІ ім. І. Сікорського, 2021 — аналізує ефекти мікроканальних і ребристих внутрішніх структур для підвищення тепловидобутку в компактних апаратах.
8. Chalco Aluminum. Внутрішня рифлена труба для теплообмінника : пром. стаття / Chalco Aluminum. — <https://www.chalcoaluminum.com/uk/knowledge/inner-grooved-tube-2506-zmy/> (дата звернення: 21.02.2026)

9. Numerical study on the mechanism of heat transfer enhancement in the tube with internal axial straight micro fins. – Int. J. of Thermal Sciences. – 2024. – Vol. 199. – DOI:10.1016/j.ijthermalsci.2024.108930 (дата звернення: 21.02.2026).

10. Permatasari R., Yusuf A. M. Material selection for shell and tube heat exchanger using computational fluid dynamics method [Electronic resource] // AIP Conference Proceedings. 2018. Vol. 1977. Article 060005. DOI: 10.1063/1.5043017. URL:https://www.researchgate.net/publication/326012966_Material_selection_for_shell_and_tube_heat_exchanger_using_computational_fluid_dynamics_method (дата звернення: 07.06.2026).

11. Materials used in industrial heat exchangers [Electronic resource]. URL: <https://teplo-polis.com.ua/en/blog-teplo-polis-en/materials-used-in-industrial-heat-exchangers/> (дата звернення: 07.06.2026).

12. Rodriguez P., Rodriguez P., Gandhi I. Selection of Materials for Heat Exchangers [Electronic resource]. URL: <https://www.osti.gov/etdeweb/servlets/purl/615044> (дата звернення: 07.06.2026).

13. Janikowski A. Selecting Tubing Materials for Power Generation Heat Exchangers [Electronic resource]. Power-Gen International, 2007. URL: <https://www.plymouth.com/wp-content/uploads/2017/04/Janikowski-Material-Selection-PowerGen-2007.pdf> (дата звернення: 07.06.2026).

14. Процеси та обладнання хімічних технологій. Частина 3. Теплообмінне обладнання. [Електронний ресурс]: теоретичні основи : навч. посіб. для ступеня бакалавра за освіт. програмою «Комп'ютеризовані системи проектування промислового обладнання» спец. G11 Машинобудування (за спеціалізаціями) / Корнієнко Я.М. Степанюк А.Р., Гулієнко С.В., Гайдай С.С. – Електрон. текст. дані (1 файл). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2025. – 253 с.

15. Теплообмінне обладнання в промисловості: застосування та переваги [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://ankort.com/ua/teploobminne-obladnannya-v-promislovosti-zastosuvannya-ta-perhevagi/> (дата звернення: 19.04.2026).

ЛН21.01.101.001 ПЗ	Інд. змін.	Дата видання	Мова UA	Аркуш 98
--------------------	------------	--------------	------------	-------------

16. Процеси і апарати харчових виробництв. Теплообмінні процеси: Підручник / В.С. Бойко, К.О. Самойчук, В.Г. Тарасенко, О.П. Ломейко. Мелітополь, 2020. 300 с.

17. NPTEL. *Heat Transfer – Module 1* [Електронний ресурс]. URL: <https://archive.nptel.ac.in/content/storage2/courses/103103027/pdf/mod1.pdf> (дата звернення: 25.04.2026).

18. Левченко Б. О. Тепло- і масообмінні апарати і установки промислових підприємств : [навч. посіб. студ. техн. спец] / Б. О. Левченко [та ін.]. – Харків : ХГПУ, 1999. – Ч.1. – 420 с.

19. Технологія хімічних процесів і апаратів [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://textbook.tou.edu.kz/books/083/1_1.html (дата звернення: 25.04.2026).

20. Microchannel heat exchanger apparatus : пат. WO 2026029715 A1, МПК F28D / Nichaporn Sirimungkalakul та ін. ; заявник PTT PCL. № PCT/TH2025/050027 ; заявл. 22.07.2025 ; опубл. 05.02.2026 (дата звернення: 25.04.2026).

21. Particle heat exchanger, temperature-swing adsorber unit comprising the same, and uses thereof : заявка на європейський патент EP 4696398 A1, МПК B01D 53/04, B01D 53/26, F28D 7/08 / Green Edward ; заявник Qaptis Sàrl (CH). № 24195070.8 ; заявл. 16.08.2024 ; опубл. 18.02.2026, Бюл. 2026/08 <https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/092458959/publication/EP4696398A1?q=EP4696398A1> (дата звернення: 25.04.2026).

22. Fin tube air cooler applied to aromatic hydrocarbon extraction : корисна модель CN 221527443 U, МПК F28D / Li Wen та ін. ; заявник Shandong Laigang Huanyou Chemical Energy Co Ltd. № CN202323668219.2U ; заявл. 29.12.2024 ; опубл. 13.08.2025 (дата звернення: 25.04.2026).

23. A mixed heating method, a mixed heater and a heating furnace : пат. CN 118328725 A, МПК F24H / заявник (згідно з публікацією). № заявки CN ; опубл. 2024 (дата звернення: 25.04.2026).

24. Freezer : корисна модель CN 221648840 U, МПК F25D / Ye Minping, Liu Hui ; заявник Qingdao Hisense Commercial Cold Chain Co Ltd. № CN202420093415.7U ; заявл. 15.01.2025 ; опубл. 03.09.2025 (дата звернення: 25.04.2026).

25. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень : ДСН 3.3.6.042-99. – Київ : МОЗ України, 1999. – 28 с.

26. Будинки і споруди. Природне і штучне освітлення : ДБН В.2.5-28:2018. – Київ : Мінрегіон України, 2018. – 134 с.

27. Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку : ДСН 3.3.6.037-99. – Київ : МОЗ України, 1999. – 15 с.

28. Вібрація загальна та локальна : ДСН 3.3.6.039-99. – Київ : МОЗ України, 1999. – 12 с.

29. Правила безпеки систем газопостачання України : НПАОП 40.1-1.32-01. – Київ : Держнаглядохоронпраці України, 2001. – 110 с.

30. ДБН В.1.1-7:2016 Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги. – Київ : Мінрегіон України, 2016. – 85 с.

31. Захисний одяг. Загальні вимоги : ДСТУ EN ISO 13688:2016. – Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016. – 18 с.

32. Гранично допустимі концентрації хімічних речовин у повітрі робочої зони : ГН 3.3.5-8.6.6.1. – Київ : МОЗ України, 2001. – 24 с.

33. Процеси та обладнання хімічних технологій. Частина 1. Практикум [Електронний ресурс]: навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра за освітньою програмою «Комп'ютерно-інтегровані технології проектування обладнання хімічної інженерії» спеціальності 133 Галузеве машинобудування / Корнієнко Я. М., Степанюк А. Р., Гулієнко С. В., Гайдай С. С., Семінський О. О. ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 9,9 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. – 468 с.

34. Конструювання і розрахунок основних елементів посудин та апаратів [Електронний ресурс]: підруч. для здобувачів ступеня бакалавра за

спец. 133 Галузеве машинобудування; КПІ ім. Ігоря Сікорського – Електрон. текст. дані (1 файл). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. – 428 с.

35. Андреев, І. А. Конструювання і розрахунок опорних вузлів посудин і апаратів хімічних виробництв [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 133 «Галузеве машинобудування» / І. А. Андреев ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 3,26 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 94 с. – Назва з екрана.

36. Андреев, І. А. Конструювання і розрахунок кожухотрубних теплообмінників [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 133 «Галузеве машинобудування» / Ігор Андреев ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 5.28 Мбайт). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 140.

37. Правила охорони праці під час експлуатації тепломеханічного обладнання : НПАОП 0.00-1.69-13. Київ : Міністерство енергетики та вугільної промисловості України, 2013. 96 с.

38. Типове положення про порядок проведення навчання і перевірки знань з питань охорони праці : НПАОП 0.00-4.12-05. Київ : Держнагляд охорони праці України, 2005. 32 с.

39. ДСТУ EN 166:2017. Засоби індивідуального захисту очей. Технічні вимоги. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2018. 52 с.

40. ДСН 3.3.6.042-99. Державні санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень. Київ : Міністерство охорони здоров'я України, 1999. 11 с.

41. НПАОП 0.00-1.69-13. Правила охорони праці під час експлуатації тепломеханічного обладнання електростанцій, теплових мереж і тепловикористовувальних установок.

42. ТОВАЖНЯНСЬКИЙ Л. Л. та ін. Процеси і апарати хімічних виробництв : підручник. Харків : НТУ «ХП», 2007.

43. РД 50-33-80 Методичні вказівки. Визначення рівня уніфікації та стандартизації виробів.

44. Задольський А.М., Шаповаленко О.О. Методичні вказівки до виконання економічної частини дипломних проектів бакалаврів. Київ, 2010 – 15 с.

Додаток А Документація до патентного дослідження

РЕГЛАМЕНТ ПОШУКУ № ЛН21.01.101.000 РП

Найменування теми: Кожухотрубний дефлегматор.

Шифр теми: ЛН21.01.101.000

Етап: Проектування кожухотрубного дефлегматор та його складових частин

Номер, дата завдання на проведення патентних досліджень

ЛН21.01.101.000, 20.04.2026

Обґрунтування регламенту пошуку:

Предмет пошуку – 1) Кожухотрубний дефлегматор (об'єктом пошуку є винаходи й корисні моделі).

Мета пошуку інформації – визначення патентної ситуації щодо теплообмінних апаратів (визначення патентоздатності проєктованого апарата й визначення тенденцій розвитку даного напрямку в техніці).

Визначення держав пошуку. Встановлюємо такі держави пошуку: усі держави, окрім країн-агресорів.

Ретроспективність. Термін дії патенту на винахід в Україні 20 років, а регламент пошуку встановлюємо такий: 20.04.25-31.05.26 року.

Класифікаційні індекси. Міжнародна патентна класифікація: F28D 7/00, F28F 1/00, F28F 3/00, F28F 13/00, F28F 17/00, F28F 19/00, F28F 21/00.

Уніфікована десяткова класифікація УДК 66.081.

Джерела інформації. 1) патентна інформація: описи до винаходів, офіційні патентні бюлетені Китаю; 2) науково-технічна інформація: підручники й навчальні посібники з курсу процесів та апаратів хімічного та нафтопереробного виробництва; 3) інтернет ресурси: <https://worldwide.espacenet.com/>.

Початок пошуку 18.04.2026

Закінчення пошуку 07.06.2026

ДОВІДКА ПРО ПОШУК № ЛН21.01.101.000 ДП

Завдання на проведення патентних досліджень ЛН21.01.101.000
20.04.2026

Етап: Проектування апарата та його складових частин

Номер, дата регламентного пошуку: № ЛН21.01.101.000 РП, 20.04.2026

Початок пошуку: 20.04.2026 Закінчення пошуку 07.06.2026

Таблиця А.1 - Регламент пошуку (форма Б.1 згідно ДСТУ 3575-97).

Предмет пошуку (ОГД, його складові частини)	Мета пошуку інформації	Держав а пошуку	Класифіка ційні індекси	Ретроспекти вність пошук у	Джерела інформації
Кожухотрубний дефлегматор	Визначення патентоздатності проєктованого апарата й тенденції розвитку цього напрямку в техніці	Україна, США, Велика Британія, Німеччина, Франція, Японія, Канада, Китай, Фінляндія, Італія	F28D 7/00, F28F 1/00, F28F 3/00, F28F 13/00, F28F 17/00, F28F 19/00, F28F 21/00	20.04.2026-07.06.2026	Національні і зарубіжні офіційні бюлетні. Описи винаходів і корисних моделей, Всесвітня організація інтелектуальної власності

Таблиця А.2 – Джерела інформації, які використанні під час патентного пошуку

Предмет пошуку (ОГД, його складові частини)	Мета пошуку інформації	Класифікаційні індекси	Інформаційна база,	Джерела інформації	
				Патентна інформація	Інша науково-технічна інформація
Кожухотрубний дефлегматор	Україна, США, Велика Британія, Німеччина, Франція, Японія, Канада, Китай, Фінляндія, Італія	F28D 7/00, F28F 1/00, F28F 3/00, F28F 13/00, F28F 17/00, F28F 19/00, F28F 21/00	https://worldwide.espacenet.com/ Фонд КПІ ім. Ігоря Сікорського	Описи винаходів та корисних моделей патентів в Україні, США, Китаю	Я.М Корнієнко Процеси та обладнання хімічної технології . / К.: НТУУ «КПІ», 2011.- 300с. Мікуценок І. О. Інтелектуальна власність та патентознавство [Електронний ресурс]: підручник для студентів, які навчаються за програмами підготовки магі-

					стрів / І. О. Мікульон ок; КПП ім. Ігоря Сікорського. - 3-те вид., переробл. та доп. - Електронні текстові дані (1 файл: 6,71 Мбайт). Київ: Політехніка, 2019, 246 с.
--	--	--	--	--	---

Таблиця А.3 – Патента документація, відібрана для подальшого аналізу

ОГД, його складові частини	Документи на об'єкти промислової власності	
	Бібліографічні дані	Відомість щодо їхньої дії
Microchannel heat exchanger apparatus	Microchannel heat exchanger apparatus : пат. WO 2026029715 A1, МПК F28D / Nichaporn Sirimungkalakul та ін. ; заявник PTT PCL. № PCT/TH2025/050027 ; заявл. 22.07.2025 ; опубл. 05.02.2026	Діє
Particle heat exchanger, temperature-swing adsorber unit comprising the same, and uses thereof	Particle heat exchanger, temperature-swing adsorber unit comprising the same, and uses thereof : заявка на європейський патент EP 4696398 A1, МПК B01D 53/04, B01D 53/26, F28D 7/08 / Green Edward ; заявник Qaptis Sàrl (CH). № 24195070.8 ; заявл. 16.08.2024 ; опубл. 18.02.2026, Бюл. 2026/08 https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/092458959/publication/EP4696398A1?q=EP4696398A1	Діє
Fin tube air cooler applied to aromatic hydrocarbon extraction	Fin tube air cooler applied to aromatic hydrocarbon extraction : корисна модель CN 221527443 U, МПК F28D / Li Wen та ін. ; заявник Shandong Laigang Huanyou Chemical Energy Co Ltd. №	Діє

	CN202323668219.2U ; заявл. 29.12.2024 ; опубл. 13.08.2025	
A mixed heating method, a mixed heater and a heating furnace	A mixed heating method, a mixed heater and a heating furnace : пат. CN 118328725 A, МПК F24H / заявник (згідно з публікацією). № заявки CN ; опубл. 2025	Діє
Freezer	Freezer : корисна модель CN 221648840 U, МПК F25D / Ye Minping, Liu Hui ; заявник Qingdao Hisense Commercial Cold Chain Co Ltd. № CN202420093415.7U ; заявл. 15.01.2025 ; опубл. 03.09.2025	Діє

Висновок: У результаті патентного пошуку встановлено, о запропаний апарат та його компоненти відповідають критеріям патентної чистоти для винаходу корисної моделі. Це підтверджується тим, о жодна з ключових ознак наближчій існуючих аналогів не була застосована в розроблених проектних рішеннях.

Додаток Б Програмний розрахунок елемента апарата

Алгоритмічна блок-схема перевірного розрахунку труб на міцність, стійкість і жорсткість труб у решітці наведена на рисунку Б.1.

На рисунку Б.1 зображено блок-схему для розрахунку

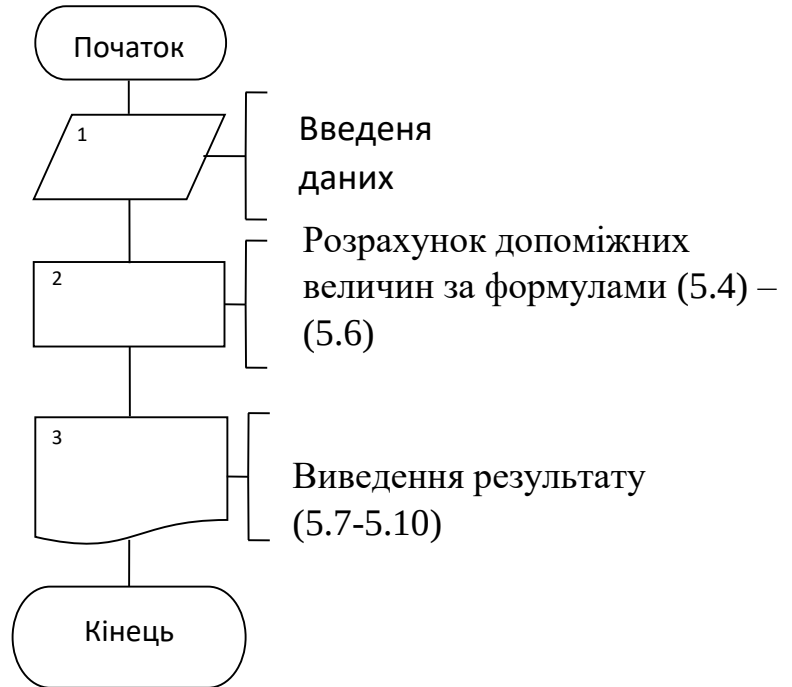


Рисунок Б.1 - Блок-схема перевірного розрахунку труб на міцність, стійкість і жорсткість труб у решітці

Розрахунок труб на міцність стійкість та жорсткість

Вихідні данні

Внутрішній радіус кожуха

$$\alpha := 0.3 \text{ м}$$

Відстань від осі кожуха до осі найбільш віддаленої труби

$$\alpha_1 := 0.277$$

Коефіцієнт впливу тиску на трубну решітку з боку міжтрубного простору η_M

$$\eta_M := 0.579$$

Коефіцієнт впливу тиску на трубну решітку з боку трубного простору η_T

$$\eta_T := 0.703$$

Зведене відношення жорсткості труб до жорсткості кожуха ρ

$$\rho := 5.976$$

Зведений тиск на решітку p_0

$$\rho_0 := 1.706$$

Коефіцієнт системи решітка – труби β

$$\beta := 13.475 \quad K_{q1} := 0$$

Зведений тиск на фланці p_1

$$p_1 := 5.95 \cdot 10^{-3}$$

Зведене відношення жорсткості труб до жорсткості фланцевого з'єднання ρ_1

$$\rho_1 := 5.64$$

Коефіцієнти T

$$T_1 := 9.51$$

$$T_2 := 5.53$$

$$T_3 := 6.14$$

Розподілена по краю трубної решітки сила, що перерізує Q_{Π}

$$Q_{\Pi} := 0.366 \frac{\text{МН}}{\text{м}}$$

Розподілена по периметру перфорованої зони решітки сила, що перерізує Q_a

$$Q_a := 0.397 \frac{\text{МН}}{\text{м}}$$

Коефіцієнти Φ_1, Φ_2, Φ_3

$$\Phi_1 := 5.75$$

$$\Phi_2 := 3.883$$

Кількість труб

$$n_{\text{тр}} := 206$$

Тиск

$$p_{\text{ш}} := 0.12$$

$$p_t := 0.1$$

$$K_q := 1 + K_{q1} = 1$$

Зовнішній діаметр труби

$$d_z := 0.025 \text{ м}$$

Товщина труби

$$S_T := 0.002$$

Допустиме напруження, МПа

$$\sigma_K := 164$$

Розрахунок

Згинальний момент, розподілений по периметру трубної решітки $\frac{\text{МН} \cdot \text{м}}{\text{м}}$

$$M_n := \left(\frac{\alpha_1}{\beta} \right) \cdot \frac{p_1 \cdot (T_1 + \rho \cdot K_q) - \rho_0 \cdot T_2}{(T_1 + \rho \cdot K_q) \cdot (T_3 + \rho_1) - T_2^2} + 0.009 \text{ explicit, ALL} \rightarrow \frac{0.277}{13.475} \cdot \frac{5.95 \cdot 10^{-3} \cdot (9.51 + 5.976) - 1.706 \cdot 5.53}{(9.51 + 5.976) \cdot (6.14 + 5.64) - 5.53^2} + 0.009 = 7.735 \times 10^{-3}$$

Згинальний момент, розподілений по периметру перфорованої частини трубної

решітки, $\frac{\text{МН} \cdot \text{м}}{\text{м}}$:

$$M_3 := M_n + (\alpha - \alpha_1) \cdot Q_{\Pi} \text{ explicit, ALL} \rightarrow 0.0077352797041036385 + (0.3 - 0.277) \cdot 0.366 = 0.016$$

Осьова сила, яка діє на трубу, МН:

$$N_t := \frac{\pi \cdot \alpha_1}{n_{\text{тр}}} \cdot [(\eta_M \cdot p_{\text{ш}} - \eta_T \cdot p_t) \cdot \alpha_1 + \Phi_1 \cdot Q_a + \Phi_2 \cdot \beta \cdot M_3] \text{ explicit, ALL} \rightarrow \frac{\pi \cdot 0.277}{206} \cdot [(0.579 \cdot 0.12 - 0.703 \cdot 0.1) \cdot 0.277 + 5.75 \cdot 0.397 + 3.883 \cdot 13.475 \cdot 0.016153279704103626] = 0.013$$

Мембранне напруження в трубах в осьовому напрямку, МПа:

$$\sigma_{1T} := \frac{|N_t|}{\pi \cdot (d_z - S_T) \cdot S_T} \text{ explicit, ALL} \rightarrow \frac{|0.013212651503203251|}{\pi \cdot (0.025 - 0.002) \cdot 0.002} \text{ explicit, ALL} \rightarrow \frac{|0.013212651503203251|}{\pi \cdot (0.025 - 0.002) \cdot 0.002} = 91.429$$

Мембранне напруження в трубах в окружному напрямку, МПа:

$$\sigma_{2T} := \frac{[(d_z - S_T) \cdot \max(|p_t|, |p_{\text{ш}}|, |p_t - p_{\text{ш}}|)]}{2 \cdot S_T} \text{ explicit, ALL} \rightarrow \frac{(0.025 - 0.002) \cdot \max(|0.1|, |0.12|, |0.1 - 0.12|)}{2 \cdot 0.002} \text{ explicit, ALL} \rightarrow \frac{(0.025 - 0.002) \cdot \max(|0.1|, |0.12|, |0.1 - 0.12|)}{2 \cdot 0.002} = 0.69$$

Умова статичної міцності труб, МПа:

$$\max(\sigma_{1T}, \sigma_{2T}) \leq \sigma_K \text{ explicit, ALL} \rightarrow \max(91.4286433950156, 0.69) \leq 164 = 1$$

В таблиці Б.1 наведено перелік ідентифікаторів, використаних у даному розрахунку.

Таблиця Б.1 – Перелік ідентифікаторів

Найменування величини	Позначення	Ідентифікатор	Розмірність
Внутрішній радіус кожуха	a	a_1	м
Коефіцієнт впливу тиску на трубну решітку з боку міжтрубного простору	η_T	η_T	
Коефіцієнт впливу тиску на трубну решітку з боку міжтрубного простору η_M	η_M	η_M	
Зведене відношення жорсткості труб до жорсткості кожуха	ρ	ρ	
Зведений тиск на решітку	ρ_0	ρ_0	МПа
Коефіцієнт системи решітка – труби	β	β	1/м
Кількість труб	$n_{тр}$	$n_{тр}$	шт.
Тиск у трубному просторі	p_t	p_t	МПа
Тиск у кожусі	p_m	p_m	МПа
Зведений тиск на фланці	p_1	p_1	МПа
Розподілена по краю трубної решітки сила, що перерізує	Q_n	Q_n	$\frac{MN}{m}$
Розподілена по периметру перфорованої зони решітки сила, що перерізує	Q_a	Q_a	$\frac{MN}{m}$
Допустиме напруження матеріалу	σ_p	σ_k	МПа
Зовнішній діаметр труби	d_z	d_z	м
Товщина стінки труби	S_t	S_t	м
Згинальний момент, розподілений по периметру трубної решітки	M_{Π}	M_{Π}	$\frac{MN \cdot m}{m}$

Продовження таблиці Б.1

1	2	3	4
Згинальний момент, розподіленої по периметру перфорованої частини трубної решітки	M_a	M_a	$\frac{\text{МН} \cdot \text{м}}{\text{м}}$
Осьова сила, яка діє на трубу	N_T	N_T	МН
Мембранне напруження в трубах в осьовому напрямку	σ_{1T}	σ_{1T}	МПа
Мембранне напруження в трубах в окружному напрямку	σ_{2T}	σ_{2T}	МПа

Результати розрахунку за програмою розрахунку труб на міцність, стійкість і жорсткість труб у решітці наведено в таблиці Б.2.

Таблиця Б.2 – Результати розрахунку

Найменування величини	Позначення	Числове значення	Розмірність
Мембранне напруження в трубах в осьовому напрямку	σ_{1T}	91,4	МПа
Мембранне напруження в трубах в окружному напрямку	σ_{1T}	0,7	МПа

Додаток В Патенти, які використані в патентному дослідженні

(19) 国家知识产权局



(12) 实用新型专利



(10) 授权公告号 CN 221527443 U

(45) 授权公告日 2024.08.13

(21) 申请号 202323668219.2

F28F 19/00 (2006.01)

(22) 申请日 2023.12.29

F28F 9/007 (2006.01)

(73) 专利权人 山东莱钢环友化工能源有限公司

F28F 9/22 (2006.01)

地址 271100 山东省济南市钢城区艾山办事处周家坡

(72) 发明人 李文 王成 邹怡明 贫凯

郝德冰 杨忠华 徐强 郭东岳
冯文臣

(74) 专利代理机构 济南竹森知识产权代理事务
所(普通合伙) 37270

专利代理师 王茜

(51) Int. Cl.

F28D 11/04 (2006.01)

F28F 1/24 (2006.01)

F28F 21/08 (2006.01)

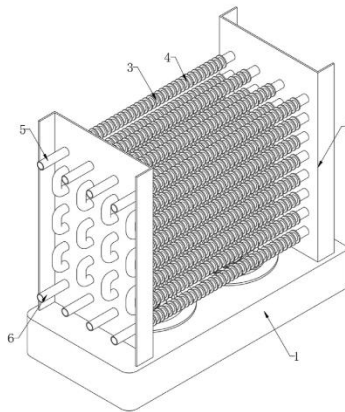
权利要求书1页 说明书3页 附图4页

(54) 实用新型名称

一种应用于芳烃抽提的翅片管空冷器

(57) 摘要

本实用属于芳烃抽提技术领域,具体涉及一种应用于芳烃抽提的翅片管空冷器,包括空冷风扇和固定连接在空冷风扇上侧的两个固定板,两个固定板上装配有位于空冷风扇上侧的散热管,散热管的外侧固定连接有若干个冷却翅片体,散热管位于上端的开口端固定连接有进水管,进水管连接有贫溶剂冷却器壳程溶剂管线出口或重质苯泵出口,散热管位于下端的开口端固定连接有出水管,固定板、散热管和冷却翅片体的材质均为碳钢,固定板、散热管和冷却翅片体的表面经过热浸镀锌表面处理。本实用能够在芳烃抽提的过程中减少散热管外壁上水垢的产生,减少水垢对冷却介质温度控制的精度影响,降低维护成本,并减少冷却器串漏造成的水串油事故。



CN 221527443 U



(11) EP 4 696 398 A1

(12) EUROPEAN PATENT APPLICATION

- (43) Date of publication: 18.02.2026 Bulletin 2026/08
- (51) International Patent Classification (IPC):
B01D 53/04^(2006.01) B01D 53/26^(2006.01)
F28D 7/08^(2006.01)
- (21) Application number: 24195070.8
- (52) Cooperative Patent Classification (CPC):
B01D 53/0462; B01D 53/0415; B01D 53/0438;
B01D 53/261; F28D 7/085; B01D 2257/504;
B01D 2258/01; B01D 2259/40088; F28F 9/027
- (22) Date of filing: 16.08.2024

(84) Designated Contracting States: AL AT BE BG CH CY CZ DE DK EE ES FI FR GB GR HR HU IE IS IT LI LT LU LV MC ME MK MT NL NO PL PT RO RS SE SI SK SM TR Designated Extension States: BA Designated Validation States: GE KH MA MD TN	(71) Applicant: Qaptis Sàrl 1015 Lausanne (CH) (72) Inventor: GREEN, Edward Oakdale, PA 15071 (US) (74) Representative: ABREMA SA Avenue du Théâtre 16 1005 Lausanne (CH)
--	---

(54) PARTICLE HEAT EXCHANGER, TEMPERATURE-SWING ADSORBER UNIT COMPRISING THE SAME, AND USES THEREOF

(57) There is described a particle heat exchanger (PHE) comprising a vessel (VL) configured to contain particles (SP) and a heat exchanger structure (HEX) extending inside the vessel (VL) and configured to allow a thermal heat transfer fluid (HF) to selectively flow through the heat exchanger structure (HEX) to cause transfer of thermal energy between the thermal heat transfer fluid (HF) and the particles (SP) contained in the vessel (VL). The heat exchanger structure (HEX) includes at least one inlet manifold (100) and at least one outlet manifold (200), as well as a plurality of serpentine tubes (ST) connected between the inlet and outlet manifolds (100, 200), each serpentine tube (ST) including multiple parallel tube sections (STa) extending substantially vertically inside the vessel (VL) and connected in series by bent tube sections (STb).

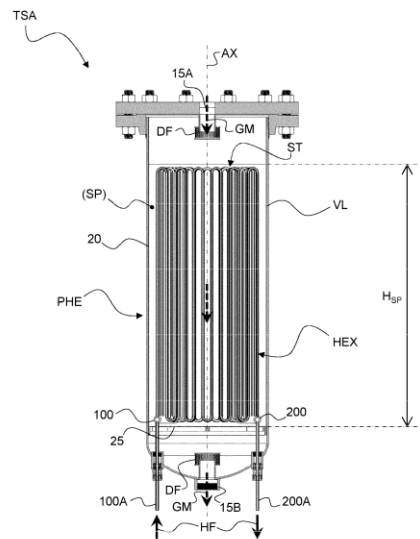


Fig. 1D
(A-A)

EP 4 696 398 A1



(21) 申请号 202410587786.5

F27D 17/00 (2006.01)

(22) 申请日 2024.05.13

(71) 申请人 重庆市能源利用监测中心(重庆市
节能技术服务中心)

地址 400000 重庆市江北区建北三支路21
号

(72) 发明人 黎荣佐 黄勇 吴思聪 张全壮
刘昌霖 陈浩宇

(74) 专利代理机构 重庆信航知识产权代理有限
公司 50218

专利代理师 吴彬

(51) Int. Cl.

F27D 19/00 (2006.01)

F23C 5/08 (2006.01)

F23C 9/06 (2006.01)

权利要求书1页 说明书4页 附图3页

(54) 发明名称

一种混合加热方法、混合加热器及加热炉

(57) 摘要

本发明公开了一种混合加热方法、混合加热器及加热炉,所述混合加热方法包括在加热炉上设置电加热器和燃气加热器,比较当前时间段的电加热器使用成本和燃气加热器的使用成本,并根据比较结果进行加热方式选择。所述混合加热器包括电加热器和燃气加热器,所述加热炉设置有混合加热器。本发明混合加热方法、混合加热器及混合加热炉,其能根据情况选择只用可燃气体加热、只用电加热或者同时采用可燃气体和电加热,使得企业能根据当前电价、天然气价格、加热温度要求等实际情况需要合理的选择加热方式,有利于降低企业能耗成本,并保证加热质量。



(12) INTERNATIONAL APPLICATION PUBLISHED UNDER THE PATENT COOPERATION TREATY (PCT)

(19) World Intellectual Property
Organization
International Bureau

(43) International Publication Date
05 February 2026 (05.02.2026)



(10) International Publication Number
WO 2026/029715 A1

(51) International Patent Classification:

F28D 9/00 (2006.01) F28F 3/08 (2006.01)
F28F 3/02 (2006.01) F28F 9/02 (2006.01)

(21) International Application Number:

PCT/TH2025/050027

(22) International Filing Date:

22 July 2025 (22.07.2025)

(25) Filing Language:

English

(26) Publication Language:

English

(30) Priority Data:

2401004897 28 July 2024 (28.07.2024) TH

(71) Applicant: **PTT PUBLIC COMPANY LIMITED**

[TH/TH]: 555 Vibhavadi Rangsit Road, Chatuchak,
BANGKOK, 10900 (TH).

(72) Inventors: **SIRIMUNGKALAKUL, Nichaporn**; 555

Vibhavadi Rangsit Road, Chatuchak, BANGKOK, 10900
(TH). **PANPANIT, Suthi**; 555 Vibhavadi Rangsit Road,

Chatuchak, BANGKOK, 10900 (TH). **POLSAMRIT, Yuenyong**; 555 Vibhavadi Rangsit Road, Chatuchak, BANGKOK, 10900 (TH). **OUNTAKSINKUL, Khun-nawat**; 555 Vibhavadi Rangsit Road, Chatuchak, BANGKOK, 10900 (TH). **UNPHAIBOONWONG, Weerawit**; 555 Vibhavadi Rangsit Road, Chatuchak, BANGKOK, 10900 (TH). **ANUSORNAREE, Chaiyan**; 555 Vibhavadi Rangsit Road, Chatuchak, BANGKOK, 10900 (TH). **HENTOUR, Kriangkrai**; 555 Vibhavadi Rangsit Road, Chatuchak, BANGKOK, 10900 (TH).

(74) Agent: **VACHANAVUTTIVONG, Darani**; Tilleke & Gibbins International Limited, No. 1011, Supalai Grand Tower, 26th Floor, Rama 3 Road, Chongnonsi Sub-District, Yannawa District, 10120 Bangkok (TH).

(81) Designated States (unless otherwise indicated, for every kind of national protection available): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CV, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IQ, IR, IS, IT, JM, JO, JP, KE, KG,

(54) Title: MICROCHANNEL HEAT EXCHANGER APPARATUS

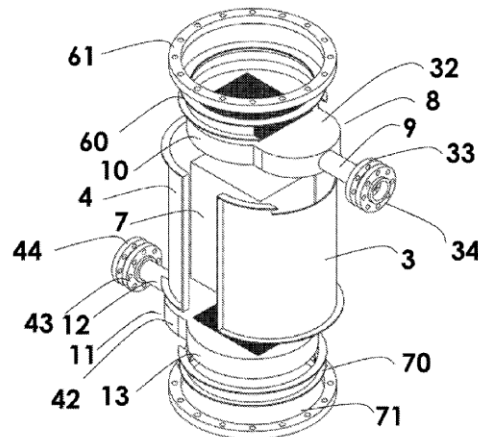


FIG. 1

(57) Abstract: A microchannel heat exchanger apparatus which is designed so that the fluid exchanges heat for reuse. Inside said heat exchanger apparatus, there is a heat exchanger, comprising a part that allow the fluid, which is selected from liquid or gas, to flow through by using a microchannel heat exchange plate, which has micron-scale small channels to increase contact surface area to achieve good heat transfer; and another part being a flat open-channel heat exchange plate to allow gas to flow in and out easily, wherein the two types of heat exchange plates are alternately positioned to achieve high-efficiency heat exchange.

[Continued on next page]

WO 2026/029715 A1

(19) 国家知识产权局



(12) 实用新型专利

(10) 授权公告号 CN 221648840 U

(45) 授权公告日 2024.09.03

(21) 申请号 202420093415.7

(22) 申请日 2024.01.15

(73) 专利权人 青岛海信商用冷链股份有限公司

地址 266100 山东省青岛市崂山区松岭399号

(72)发明人 叶闽平 刘辉

(74) 专利代理机构 青岛清泰联信知识产权代理有限公司 37256

专利代理师 李丽娟

(51) Int.Cl.

F25D 11/00 (2006.01)

F25D 25/02 (2006.01)

F25D 23/00 (2006.01)

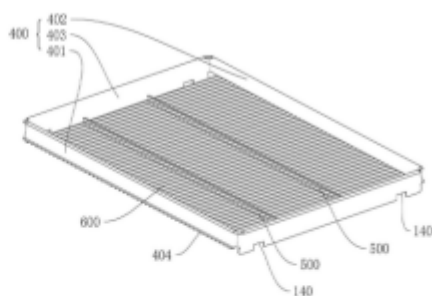
权利要求书2页 说明书12页 附图18页

(54) 实用新型名称

冷柜

(57) 摘要

本实用新型涉及一种冷柜,属于制冷设备技术领域,冷柜包括:柜体和层架,柜体内部形成有放置腔,柜体的一侧设置有与放置腔连通的开口;其中,层架设置于放置腔内;层架包括:框架、支撑梁和多个置物杆,其中,框架呈矩形;支撑梁,支撑梁设置于框架内且靠近柜体的底部,支撑梁的两端分别连接于支撑梁对应的两侧壁;多个置物杆,置物杆垂直于支撑梁,多个置物杆相互平行且沿置物杆的长度方向间隔设置多个,置物杆抵接于支撑梁朝向柜体顶部的一侧;置物杆的长度方向的两端分别可拆卸连接于框架对应的两侧。



CN 221648840 U

СПИСОК НАУКОВИХ ПРАЦЬ

студента групи ЛН-21

кафедри машин та апаратів хімічних і нафтопереробних виробництв

АНТОНЧИКА ЄВГЕНІЯ ЄВГЕНІЙОВИЧА

1. Збірник тез доповідей XXXVII всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених "Обладнання хімічних виробництві підприємств будівельних матеріалів", 01-10 грудня 2025 р. м. Київ) / Укладач Я.М. Корнієнко. – К.: «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2025. – 374 с.
2. Збірник тез доповідей XXXVIII всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених "Обладнання хімічних виробництві підприємств будівельних матеріалів", 04-05 червня 2026 р. м. Київ) / Укладач Я.М. Корнієнко. – К.: «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2026. – 262 с.

МОДЕРНІЗАЦІЯ ДЕФЛЕГМАТОРА УСТАНОВКИ АЛКІЛУВАННЯ БЕНЗОЛУ

студент Антончик Є. Є., старший викладач, к.т.н., с.н.с. Коник А.В.

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

АНОТАЦІЯ: У даній роботі представлено опис технологічної схеми одержання сирого бензолу при паровому нагріві поглинаючого масла. Розглянуто основні технологічні рішення і параметри ведення процесу алкілування. Представлено основні властивості бензолу, описано переваги і недоліки його застосування.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ТЕПЛООБМІННИЙ АПАРАТ, БЕНЗОЛ, АЛКІЛУВАННЯ.

MODERNIZATION OF THE DEPHLEGMATTER OF THE BENZENE ALKYLATION PLANT

student Antonchuk E. E., senior lecturer, Ph.D., S.N.S. Konyk A.V.

National Technical University of Ukraine

«Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

ABSTRACT: This paper presents a description of the technological scheme for obtaining crude benzene by steam heating of absorbing oil. The main technological solutions and parameters of the alkylation process are considered. The main properties of benzene are presented, the advantages and disadvantages of its use are described.

KEYWORDS: HEAT EXCHANGER, BENZENE, ALKYLATION.

Бензол (C_6H_6) – це органічна ароматична сполука, що являє собою безбарвну рідину з характерним запахом. Його молекула складається з шести атомів вуглецю, з'єднаних у плоске шестичленне кільце з делокалізованими π -

електронами, що забезпечує високу стабільність і робить бензол типовим представником ароматичних вуглеводнів. Він погано розчиняється у воді, але добре змішується з органічними розчинниками.

Хімічно бензол відзначається низькою реакційною здатністю в реакціях приєднання, проте легко вступає в реакції електрофільного заміщення, такі як нітрування, сульфонування чи галогенування. Однак, не зважаючи на свою цінність у промисловості, бензол є токсичним і вважається канцерогеном, що потребує суворого контролю умов роботи з ним. Бензол є важливою сировиною для виробництва пластмас, синтетичних волокон, гумових матеріалів, фармацевтичних препаратів, барвників і різних хімічних проміжних продуктів. Структура бензолу є основою багатьох ароматичних сполук, тому він має велике значення для органічного синтезу. Водночас через його токсичність актуальними залишаються питання безпеки, екологічного контролю та розвитку альтернативних технологій, що зменшують вплив бензолу на здоров'я людей та довкілля.

Виробництво бензолу ґрунтується переважно на переробці нафти та кам'яного вугілля. Сучасна промисловість отримує бензол головним чином методом каталітичного реформінгу, під час якого вуглеводні бензинової фракції перетворюються на ароматичні сполуки за дії каталізаторів і високої температури. Іншим поширеним способом є піроліз нафтових фракцій: у результаті високотемпературного розкладання утворюється піролізний бензин, що містить значну кількість ароматичних компонентів, з яких після очищення виділяють бензол. Традиційним, хоч і менш актуальним на сьогоднішній день методом, залишається коксування кам'яного вугілля, під час якого бензол видобувають із кам'яновугільної смоли та коксового газу шляхом абсорбції й подальшої ректифікації.

Усі ці способи виробництва зберігають свою актуальність, оскільки бензол є ключовою сировиною для виготовлення пластмас, синтетичних

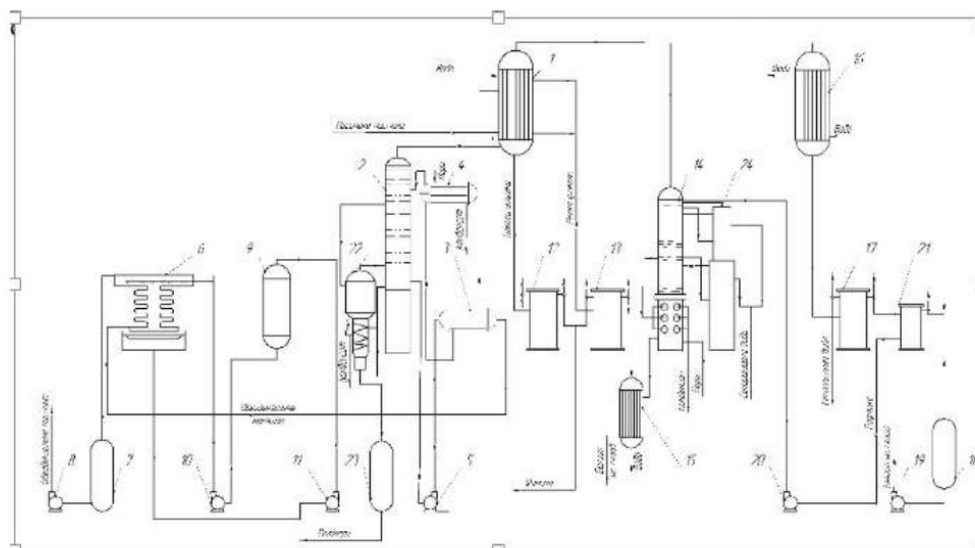
волокон, гуми, барвників, ліків та багатьох інших органічних речовин. Незважаючи на токсичність і суворі вимоги до безпеки, світова промисловість продовжує активно використовувати бензол через його центральне значення в органічному синтезі.

На рисунку 1 наведено схему сирого бензолу при паровому нагріві поглинаючого масла. Насичене бензольними вуглеводнями поглинальна олія після скрубєрів подається в дефлегматор 1, в якому нагрівається від 25-30°C до 75-80°C парами, що виходять з дистиляційної колони 2. Насичене масло надходить у трубний простір нижніх трубчаток, розташованих горизонтально простір знизу вгору. Верхня трубчатка дефлегматора охолоджується технічною водою.

Після дефлегматора масло надходить в теплообмінні апарати 3, де нагрівається знебензоленим маслом, що стікає з колони до температури 105-115°C і далі підігрівається глухою парою в паровому підігрівачі 4 до температури 130-135°C.

З парового підігрівача масло надходить у дистиляційну колону 2, в якій за допомогою гострої пари, що подається в нижню частину, відганяються бензольні вуглеводні, а також частина поглинаючої олії та води.

З нижньої частини колони знебензолене масло відкачується насосом 5 теплообмінники 3, де воно віддає частину свого тепла маслу, що надходить з дефлегматора. Після теплообмінника знебензолене масло має температуру 90-100°C.



1,16 – дефлегматор; 2 – дистиляційна колона; 3 – теплообмінний апарат;
4 – паровий нагрівач; 5,8,10,11, – насос; 6 – зрошувальний охолоджувач;
7,18,23 – збірник; 9 – конденсатор; 12,13,17,21 – сепаратор; 14 – розділова
колона; 15 – холодильник; 22 – випарник; 24 – додаткова колона.

Рисунок 1 – Схема сирого бензолу при паровому нагріві поглинаючого масла

Остаточне охолодження знебензованої олії здійснюється в зрошувальному холодильнику 6, після чого воно надходить у збірник 7 і далі насосом 8 подається на скрубери. Зрошувальний холодильник охолоджується водою, що подається після градирні 9 насосом 10, а нагріта вода відкачується насосом 11 на градирню.

Пари бензольних вуглеводнів, поглинального масла та води з дистиляційної колони 2 надходять у міжтрубний простір дефлегматора 1. У нижніх трьох трубчатках, як зазначено було вище, пари охолоджуються насиченим маслом, а у верхній трубчатці - технічною водою.

Флегми, що утворюються в дефлегматорі - важка і легка надходять у сепаратори 12 і 13, відповідно. Після обох сепараторів флегму з'єднують і

додають у цикл поглинального масла, а воду після додаткового відстоювання від масла відводять у каналізацію фенольних вод.

Після дефлегматора пари сирого бензолу і пари води, що не сконденсувалися, направляються в розподільну колону 14, в якій пари бензольних вуглеводнів поділяються на дві фракції сирого бензолу: легкий бензол (або бензол I) і важкий бензол (або бензол II).

Розподільна колона складається з двох частин: верхньої - ректифікаційної та нижньої - випарної.

Пари з дефлегматора 7 надходять в низ частини ректифікації колони і, проходячи знизу вгору, збагачуються низькокиплячими компонентами. При цьому верх колони в якості рефлюксу подається бензол I з конденсатора. Пари легкого бензолу і водяні пари з верхньої частини розділової колони надходять у конденсатор 16, конструкції аналогічний дефлегматору.

У конденсаторі відбувається конденсація та охолодження бензолу та води. Пари надходять в міжтрубний простір, проходячи зверху вниз послідовно трубчатки, а вода, що охолоджує, проходить по трубках від нижньої трубчатки до верхньої.

Бензол I і конденсат води з конденсатора надходять у сепаратор 17, звідки після відділення води бензол I направляється в бачок для рефлюксу 21.

Частина бензолу I з бака 21 як рефлюкс подається насосом 20 на верхню тарілку частини ректифікації розділової колони 14, а частина надходить у збірник 18, звідки насосом 19 подається на склад.

Для виведення конденсату води, що утворюється вгорі колони, з її верхніх тарілок, відводиться бензол I і вода в сепаратор 24, і після відділення води бензол I повертається в колону. Зазвичай сепаратор 24 відводиться рідина з другої тарілки, а повертається з сепаратора на третю тарілку зверху. В результаті конденсації, що відбувається на тарілках ректифікаційної частини колони, конденсат, що утворюється, також містить воду. Тому бензольні

вуглеводні та вода з нижньої тарілки цієї частини розділової колони виводяться в сепаратор 24, звідки після відокремлення від води бензольні вуглеводні повертаються на верхню тарілку нижньої - випарної частини розділової колони.

У випарній частині колони встановлені підігрівачі для підігріву важкого бензолу - бензолу II глухою парою. З цієї частини колони бензол II надходить до холодильника 15, звідки передається на склад.

Оскільки, якість циркулюючого поглинального масла в процесі роботи погіршується внаслідок розчинення в ньому продуктів полімеризації, що утворюються, і при цьому збільшується в'язкість і молекулярна маса поглинача, то для збереження якості масла деяка його частина виводиться з циклу масла на регенерацію.

Регенерація поглинального масла здійснюється в паровому регенераторі 22. Для цього з однієї з верхніх тарілок дистиляційної бензольної колони 2 частина поглинального масла в кількості близько 1-1,5% відводиться в регенератор, де воно нагрівається глухою парою до 160-165°C і промивається. Олія при цьому майже повністю випаровується і разом з водяними парами надходить у нижню частину дистиляційної колони.

Утворені при високій температурі з ненасичених сполук, що містяться в олії полімери, а також важкі погони масла випускаються через нижній спускний штуцер регенератора в збірник 23.

Кількість полімерів, що виводяться з регенератора, становить 10-40% від кількості масла, що направляється в регенератор [3].

Перелік посилань

1. Properties and uses of benzene. Systopt website. URL: <https://www.systopt.com.ua/ru/article-vlastyvesti-ta-zastosuvannya-benzolu> (access date: 28.11.2025).

2. Benzene — characteristics. URL:
<https://www.google.com/search?client=opera&q=бензол+характеристика&sourceid=opera&ie=UTF-8&oe=UTF-8> (access date: 28.11.2025).
3. Коробчанський І.Є., Кузнецов М.Д. Розрахунки апаратури для уловлювання хімічних продуктів коксування - М.: Металургія, 1972.

МОДЕРНІЗАЦІЯ ДЕФЛЕГМАТОРА УСТАНОВКИ АЛКІЛУВАННЯ БЕНЗОЛУ

студент Антончик Є. Є., старший викладач, д.т.н., с.н.с. Коник А.В.

Національний технічний університет України

“Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”

АНОТАЦІЯ: У роботі запропоновано модернізацію дефлегматора установки алкілування бензолу шляхом оснащення внутрішньої поверхні теплообмінних труб мікроребрами, що формують турбулентність потоку охолоджуючого середовища. Така модифікація забезпечує зниження габаритів апарата при збереженні його теплової потужності за рахунок нормалізації температурного режиму конденсації та зменшення локальних перегрівів.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ДЕФЛЕГМАТОР, АЛКІЛУВАННЯ БЕНЗОЛУ, ТЕПЛООБМІННИЙ КОЖУХОТРУБНИЙ АПАРАТ, МІКРОРЕБРА, ІНТЕНСИФІКАЦІЯ ТЕПЛООБМІНУ.

Процес алкілування бензолу вимагає високої точності підтримки температурного режиму в дефлегматорі, оскільки ефективність відділення алкілбензолів безпосередньо залежить від рівномірності конденсації та контролю фракційного складу. Традиційні кожухотрубні теплообмінники (дефлегматори), що використовуються на промислових установках, мають обмежену ефективність теплопередачі через нерівномірність розподілу пари та теплоносіїв, локальні застої та недостатню площу контактної поверхні.

Одним з перспективних напрямків модернізації дефлегматора є використання ребрення на внутрішній поверхні теплообмінних труб (рисунк 1). Така конструктивна зміна дозволяє суттєво підвищити ефективність процесу теплообміну без істотного збільшення габаритів апарата чи додаткових витрат енергії [1, 2].

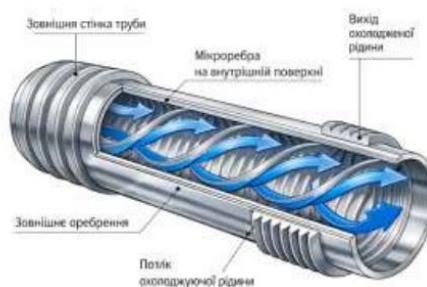


Рисунок 1 – Зображення мікроребер на внутрішній поверхні теплообмінних труб

Ідея оребрення полягає у створенні на внутрішній поверхні теплообмінних труб невеликих спіральних або поздовжніх виступів, які формують турбулентність потоку робочого середовища. Турбулентний рух сприяє підвищенню теплопередачі від стінки труби до потоку охолоджуючої рідини, зменшуючи при цьому товщину теплового пограничного шару, відповідно, підвищується коефіцієнт теплопередачі. У дефлегматорах для алкілування бензолу це дозволить більш ефективно відводити теплову енергію від конденсованих парів алкілбензолу, стабілізувати температурний режим та забезпечити рівномірну конденсацію по всій довжині апарата [2].

Методи реалізації внутрішнього оребрення у трубах дефлегматора:

1) механічне профілювання внутрішньої поверхні труб – включає гвинтове або спіральне проточування металу, холодне деформування або обробку металевими роликками для формування поздовжніх або спіральних виступів. Цей метод забезпечує точне визначення висоти та кроку ребер для оптимальної інтенсифікації теплообміну [3,4].

2) лиття або екструзія труб із інтегрованою мікроструктурою – труби виготовляються з ребристою внутрішньою поверхнею відразу при формуванні металу або композитного матеріалу. Це дозволяє отримати точні профілі ребер та уникнути додаткової механічної обробки.

3) використання вставних ребристих елементів – у гладкі труби інтегруються внутрішні вставки з поздовжніми або спіральними канавками. Такий метод забезпечує легку модифікацію існуючих труб без їх повної заміни і дозволяє експериментально підбирати оптимальний профіль для конкретного потоку [4].

Кожен із цих методів реалізує прогнозовану турбулентність потоку і підвищує коефіцієнт теплопередачі, водночас зберігаючи допустимі гідравлічні втрати. Поєднання внутрішніх мікроребер із зовнішнім оребренням труб та оптимізацією компонування пучка труб забезпечує комплексну інтенсифікацію теплообміну, що підвищує ефективність роботи дефлегматора.

Переваги застосування внутрішніх мікроребер включають:

- підвищення коефіцієнта теплопередачі в межах $10 \div 25$ % залежно від геометрії ребер і швидкості потоку;
- зменшення локальних зон перегріву та застою охолоджуючої рідини;
- можливість використання труб меншого діаметра при збереженні теплової потужності апарата;
- підвищення енергоефективності установки та зниження витрат охолоджуючого середовища.

Серед недоліків слід зазначити:

- коштовне та технологічно ускладнене виготовлення труб;
 - необхідність точного гідравлічного розрахунку;
 - складність обслуговування при очищенні внутрішніх каналів труб
- [2].

Список літератури

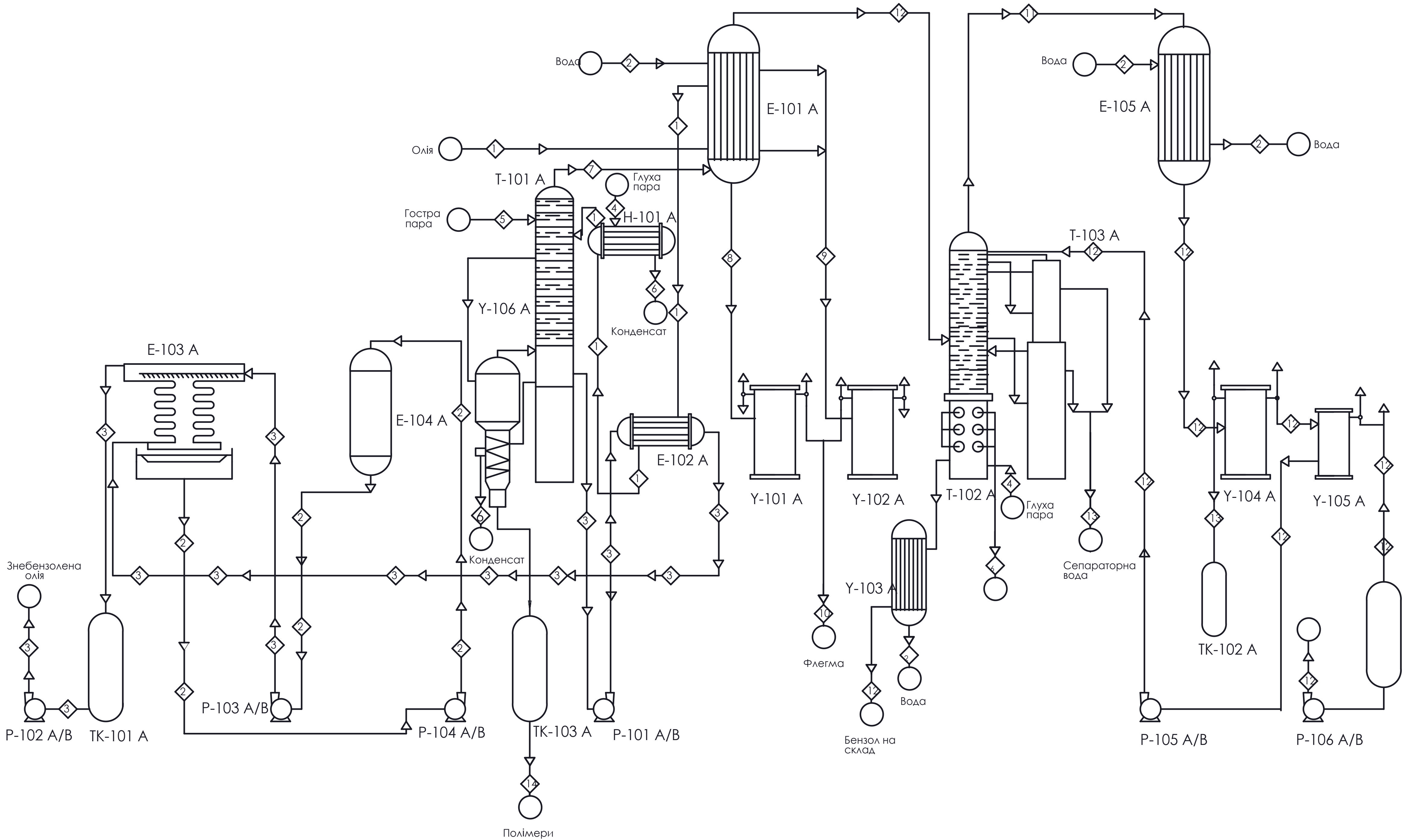
- 1) Jasiński P. B. Numerical investigation of thermo-flow characteristics of tubes with transverse micro-fins / P. B. Jasiński // *Energies*. — 2024. — Vol. 17, Issue 3, Art. 714. — DOI:10.3390/en17030714

2) Швець Н. О. Підвищення ефективності компактних теплообмінників із оребреними трубками / Н. О. Швець — магист. дис. — Київ : КПІ ім. І. Сікорського, 2021 — аналізує ефекти мікроканальних і ребристих внутрішніх структур для підвищення тепловидобутку в компактних апаратах.

3) Chalco Aluminum. Внутрішня рифлена труба для теплообмінника : пром. стаття / Chalco Aluminum. — <https://www.chalcoaluminum.com/uk/knowledge/inner-grooved-tube-2506-zmy/> (дата звернення: 21.02.2026)

4) Numerical study on the mechanism of heat transfer enhancement in the tube with internal axial straight micro fins. — Int. J. of Thermal Sciences. — 2024. — Vol. 199. — DOI:10.1016/j.ijthermalsci.2024.108930 (дата звернення: 21.02.2026).

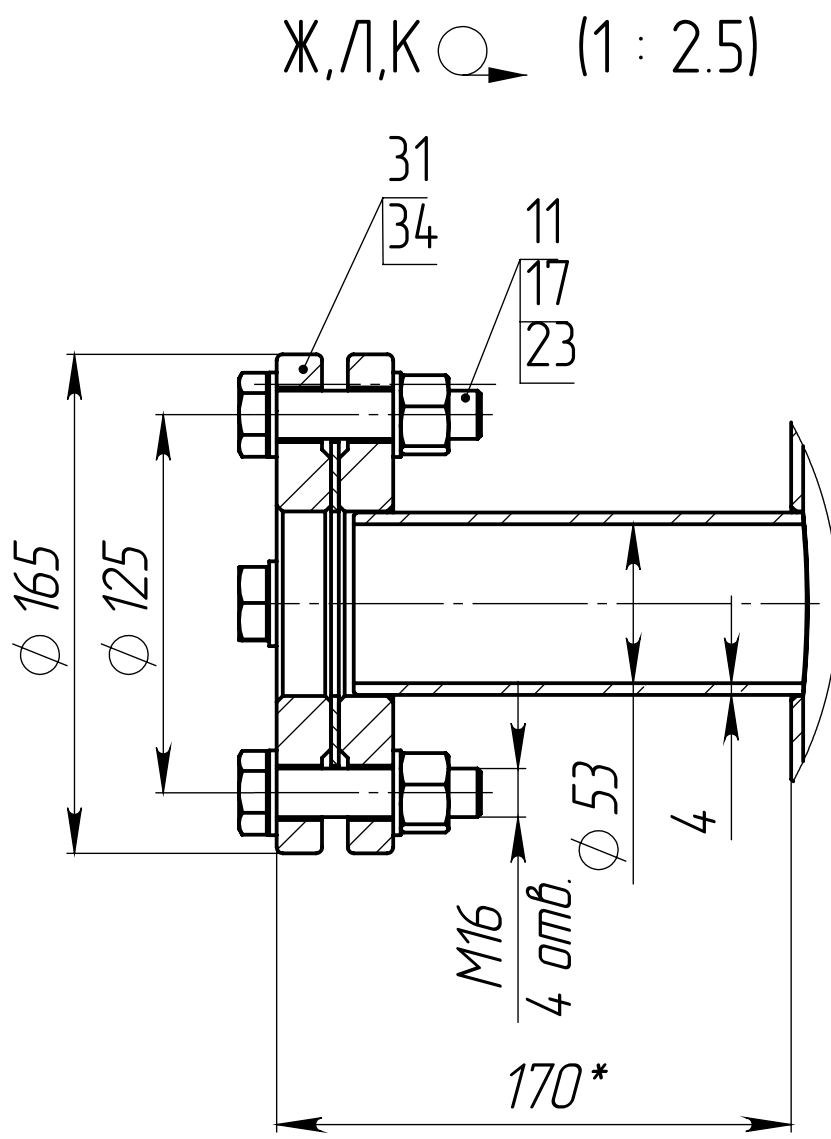
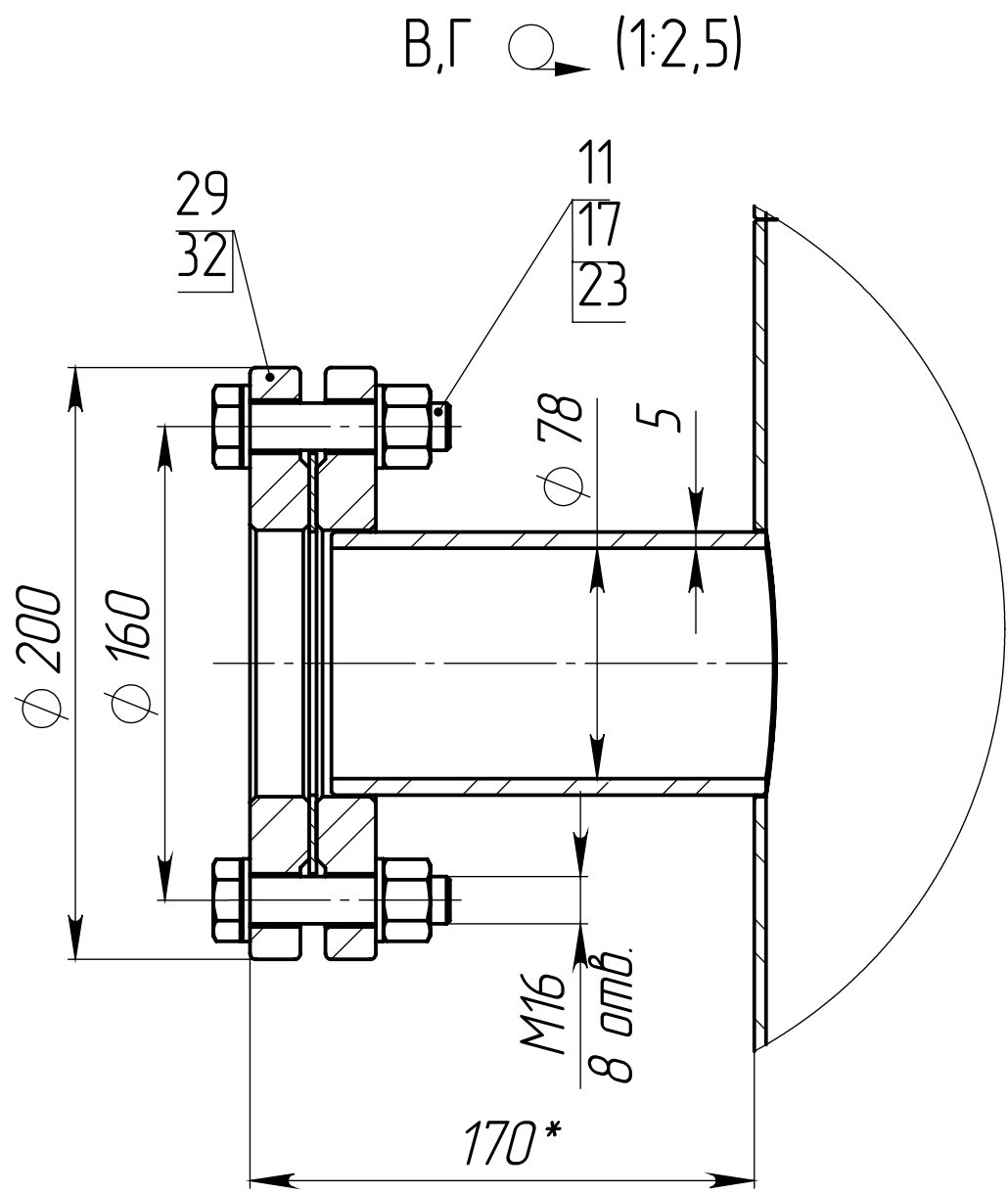
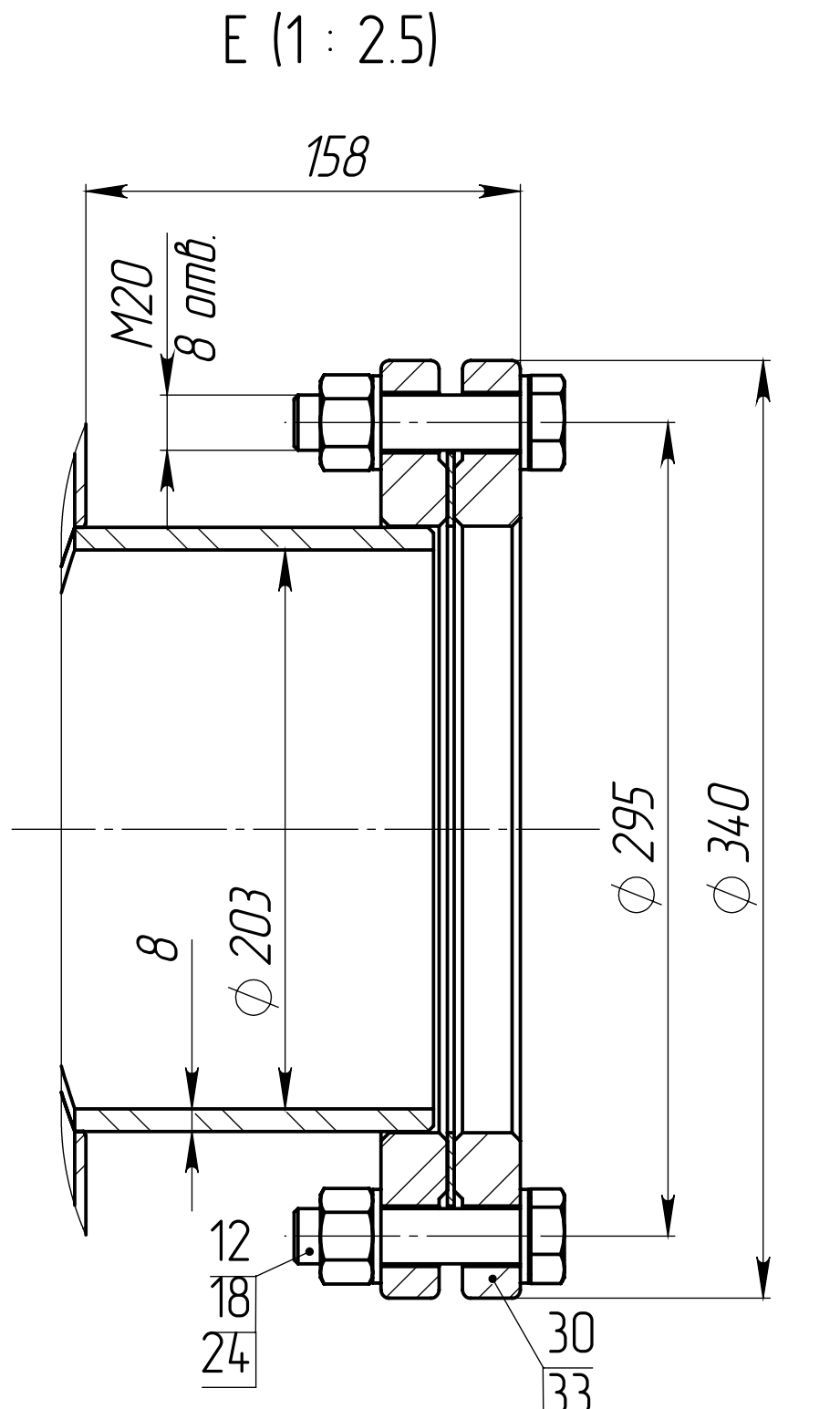
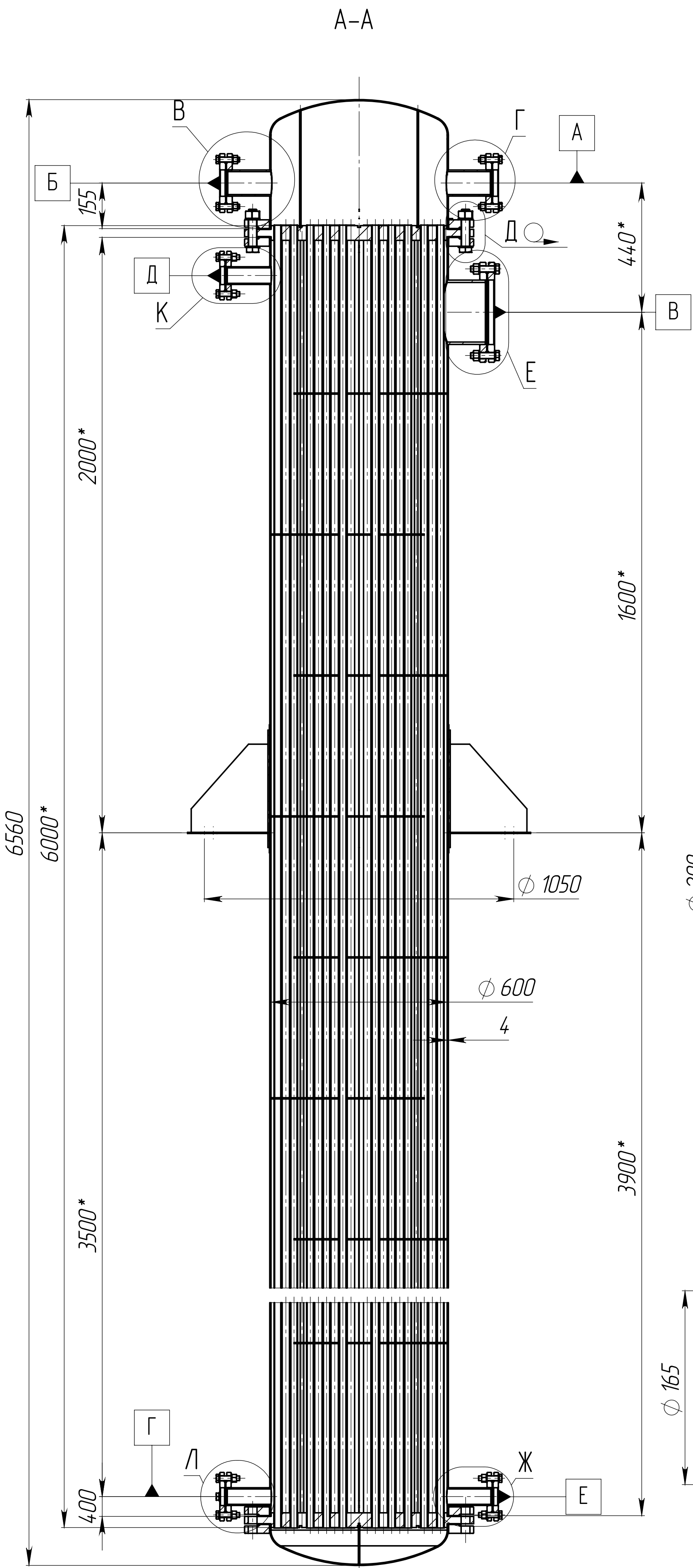
Номер потоку	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Температура (°C)	від 25 до 80		90-100	130-135										
Тиск (бар)														
Парова частка														
Загальна масова витрата (кг/год)														
Загальна мольна витрата (кмоль/год)														
Витрати окремих компонентів (кмоль/год)														



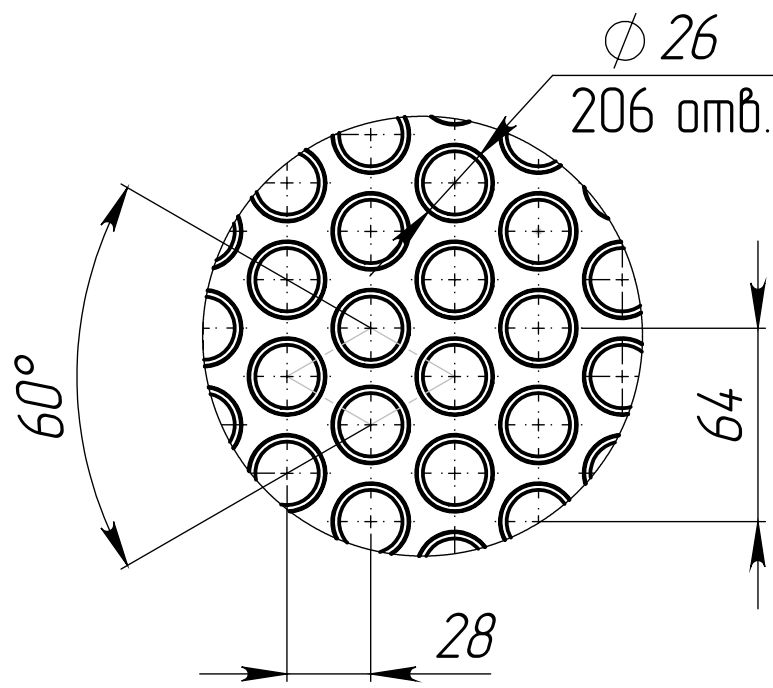
E-101 A	T-101 A	E-102 A	H-101 A	P-101 A/B	E-103 A	TK-101 A	P-102 A/B	E-104 A	P-103 A/B	P-104 A/B	Y-101 A
Дефлегматор	Дистиляційна колона	Теплообмінник	Паровий нагрівач	Насос	Паровий нагрівач	Збірник	Насос	Конденсатор	Насос	Насос	Сепаратор
Y-102 A	T-102 A	Y-103 A	E-105 A	Y-104 A	TK-102 A	P-105 A/B	P-106 A/B	Y-105 A	Y-106 A	TK-103 A	T-103 A
Сепаратор	Розділова колона	Холодильник	Дефлегматор	Сепаратор	Збірник	Насос	Насос	Сепаратор	Випарник	Збірник	Додаткова колона

SOLIDWORKS Educational Product. For Instructional Use Only.

Відповідальна організація кафедра МАХНВ	Технічне узгодження Новохат О.А.	Розробник документа Антончик Є.Є.	Документ затверджено Коник А.В.	Масштаб -	
Власник документа КПІ ім. Ігоря Сікорського		Вид документа		Статус документа	
		Технологічна схема			
		Назва, додаткова назва		ЛН21.01.101.001 С3	
		Актулювання бензолу		Інд. змін.	Дата видання



Б (1 : 2.5)



М (1 : 4)

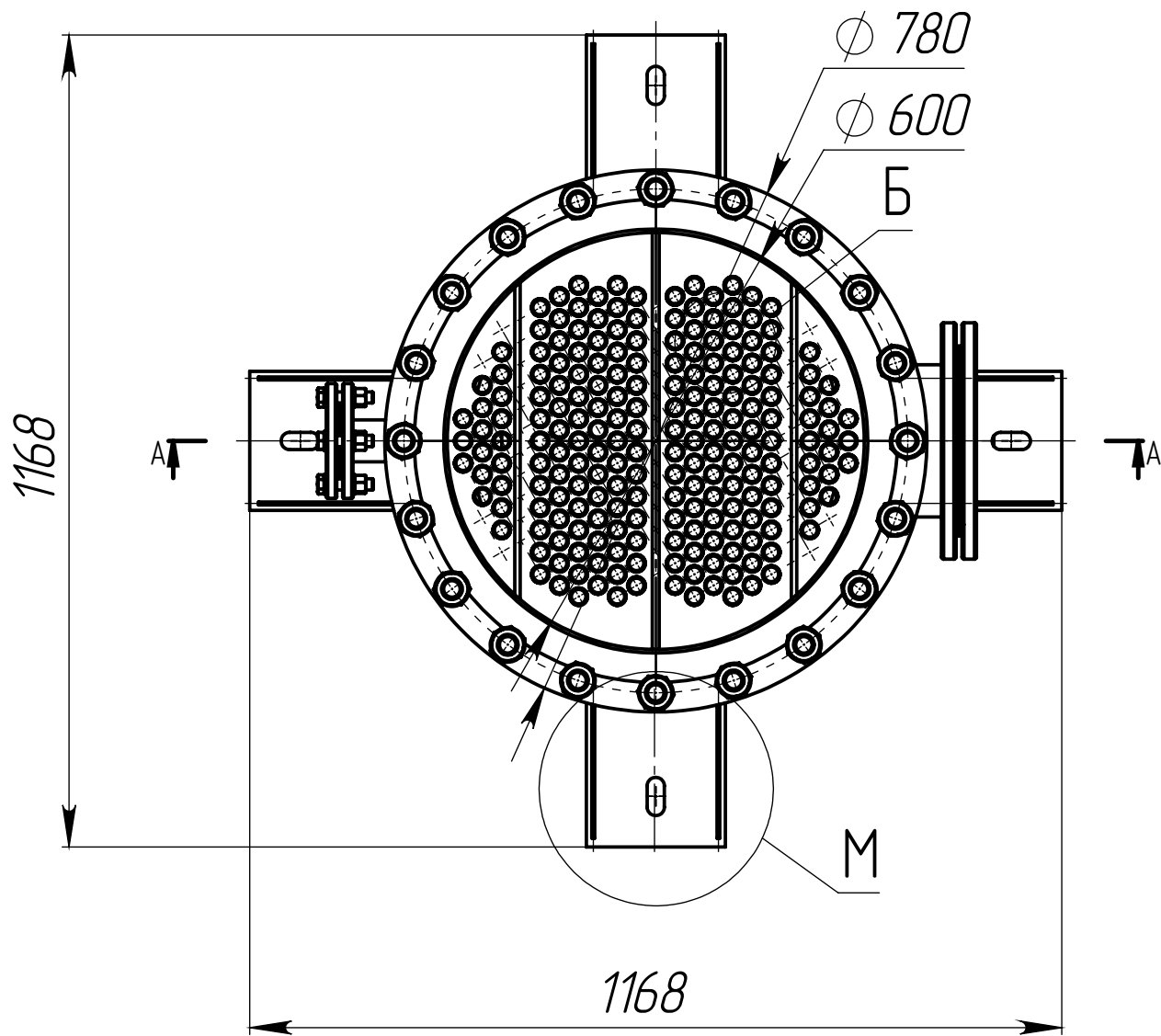
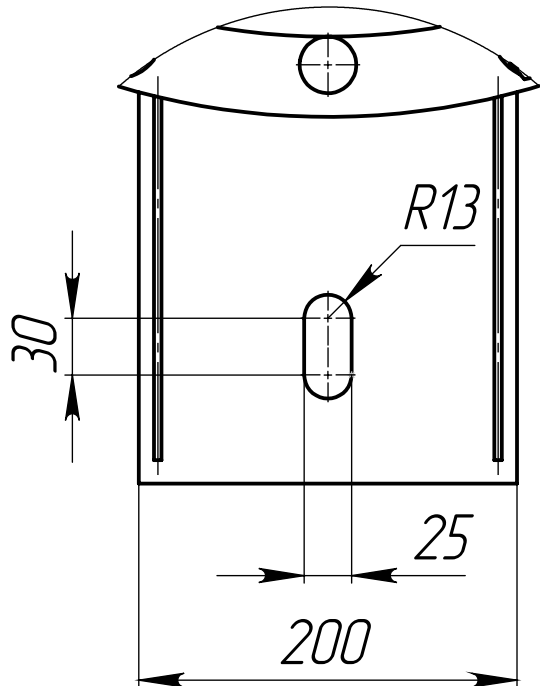
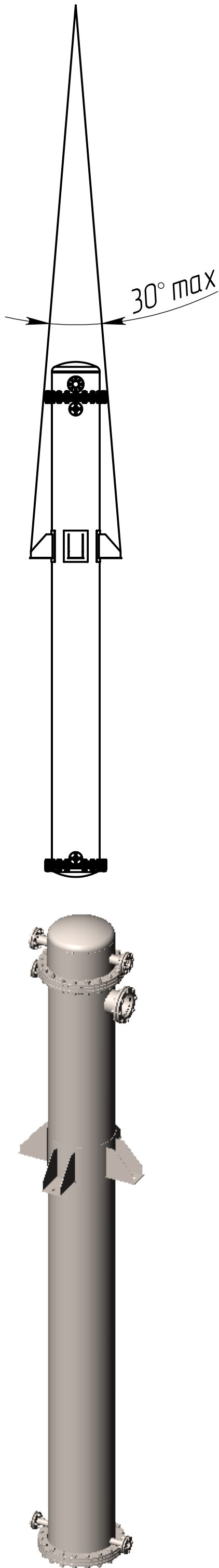
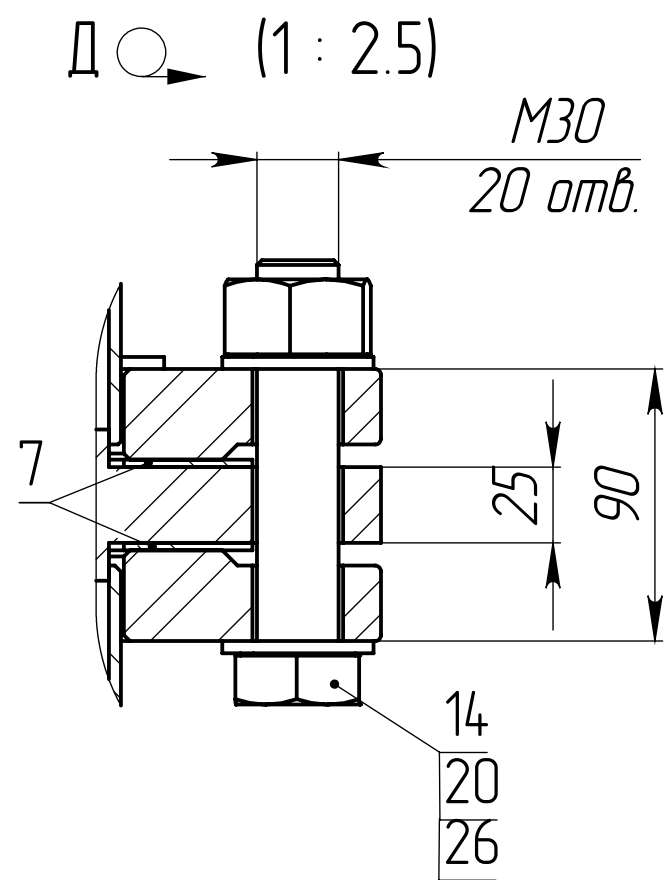


Схема стропування



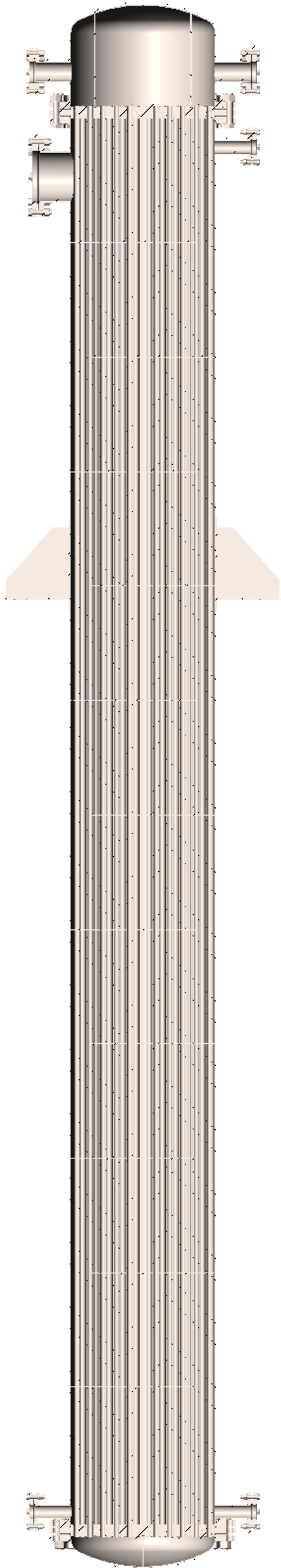
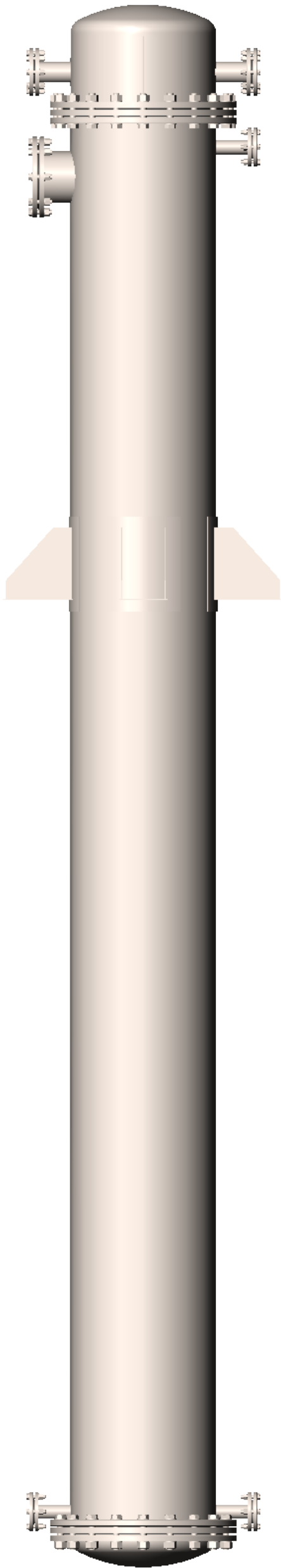
Таблиця штицерів				
Позн.	Найменування	Кльк.	Дам. Номін., мм	Тиск. Номн., МПа
А	Вхід води	1	89	0,6
Б	Вихід води	1	89	0,6
В	Вхід пари бензолу	1	219	0,6
Г	Дренаж	1	63	0,6
Д	Атмосфера	1	63	0,6
Е	Обслуговування	1	63	0,6

Технічна характеристика			
1	Апарат призначений для охолодження парів бензолу		
	Параметри	Назва робочого простору	
		Міжтрубний	Трубний
2	Робочий тиск, МПа	0,12	0,1
3	Продуктивність, кг/с	3	
4	Теплообмінні труби, мм		25x2
5	Довжина труб, м		6
6	Габаритні розміри		
	Довжина, мм	1168	
	Висота, мм	6674	
	Ширина, мм	1168	

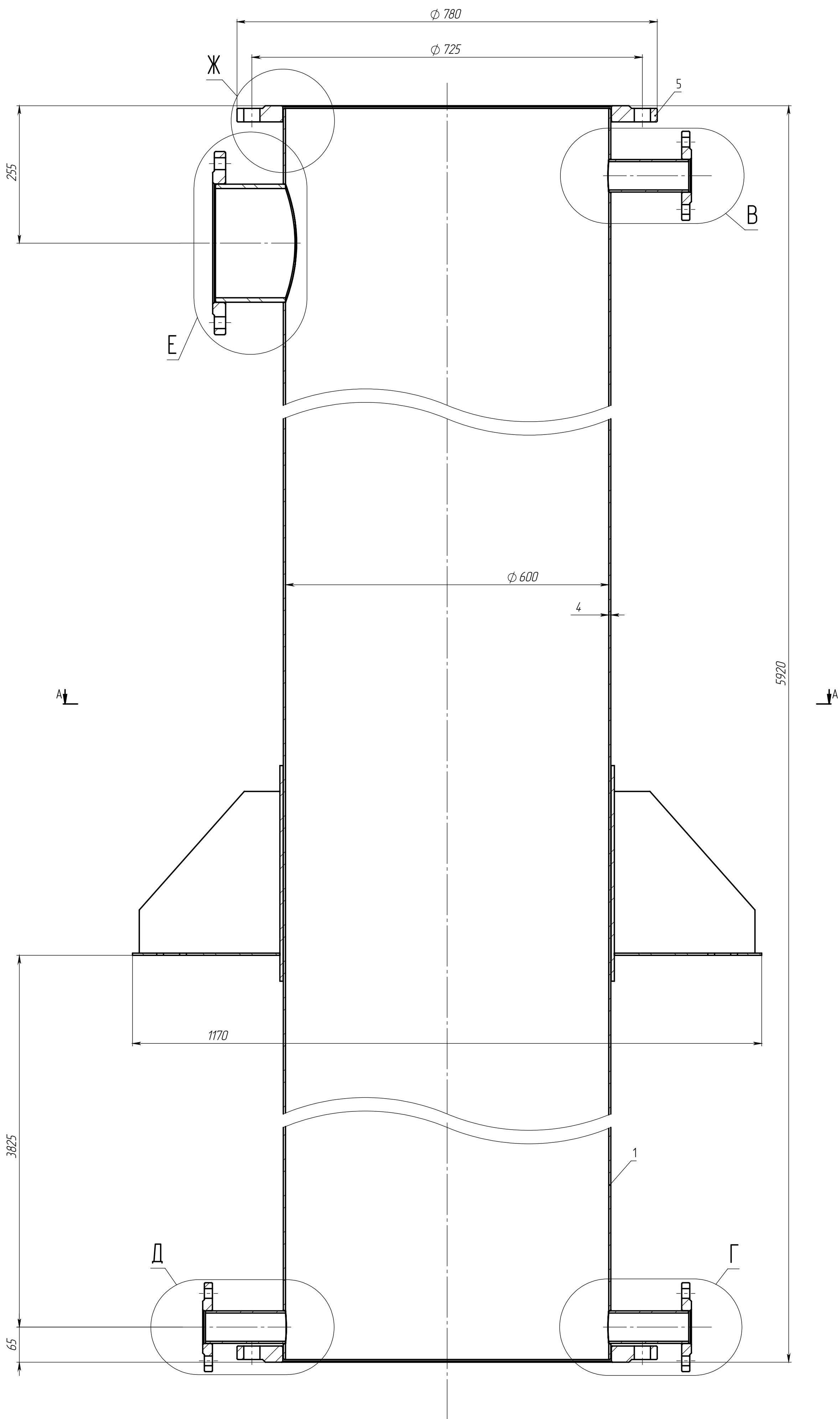
ТЕХНІЧНІ ВИМОГИ			
1	Розміри для довідок*		
2	Апарат підлягає дії Держнагляду України		
3	Основний матеріал – сталь 12Х18Н10Т		
4	Апарат випробувати згідно з тиском 0,1МПа		
5	Зварні шви контролювати рентгенопробіванням		
6	Граничне відхилення осей штицерів від нормального положення ±3 мм		
7	На місці монтажу апарату заземлити		
8	Маркувати апарат відповідно до вимог підтримки замовника		

Відповідальна організація Кафедра МАХНВ	Технічне узгодження Нобохат О.А.	Розробник документа Антончик Е.Е.	Документ затверджено Канник А.В.	
Власник документа КПІ ім. Ігоря Скорського		Вид документа Складальний креслення	Статус документа ЛН2101101.000 СК	
		Назва, додаткова назва Дефлегматор	Ід. зм.	Дата видання
			Мова UA	Аркши A1

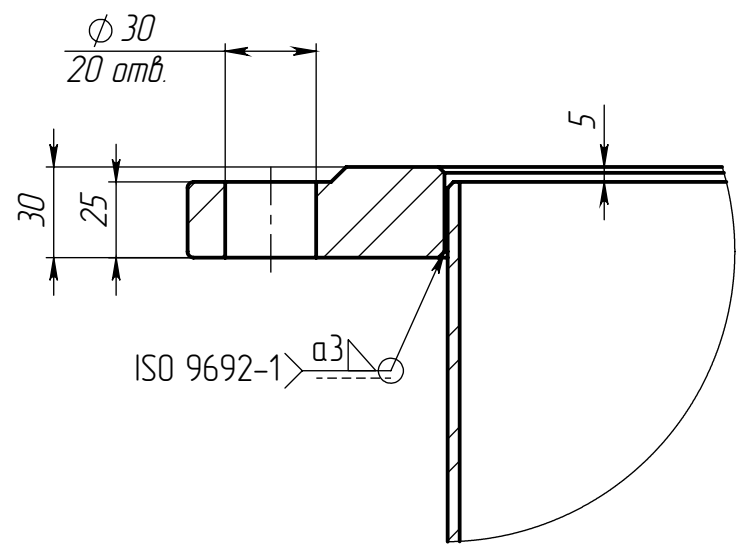
Поз-нака	Позначення	Посилання	Кіль.	Матеріал	Примітка
	<u>Документація</u>				
	Складальний кресленик	ЛН21.01.101.000 СК			
	<u>Складальні одиниці</u>				
1	Корпус	ЛН21.01.201.101	1		
2	Кришка розподільча	ЛН21.01.201.102	1		
3	Днище розподільче	ЛН21.01.201.103	1		
	<u>Деталі</u>				
4	Ущільнення кришки	ЛН21.01.301.101	2		
	<u>Стандартні вироби</u>				
	Болт				
5	Болт М 16 – 80		28		DIN 7990
6	Болт М 20 – 100		8		DIN 7990
7	Болт М 30 – 105		40		DIN 7990
	Гайка шестиграна				
8	Гайка шестиграна М 16		28		ISO 4034
9	Гайка шестиграна М 20		8		ISO 4034
10	Гайка шестиграна М 30		40		ISO 4034
Відповідальна організація Кафедра МАХНВ		Технічне узгодження Новохат О.А.	Розробник документа Антончик Е.Е.		Документ затверджено Канник А.В.
Власник документа КПІм. Ігоря Сікорського		Вид документа Специфікація		Статус документа	
		Назва, додаткова назва Дефлегматор		ЛН-21.01.101.000 СП	
				Інд. змін.	Дата видання
				Мова UA	Аркуш 1/2



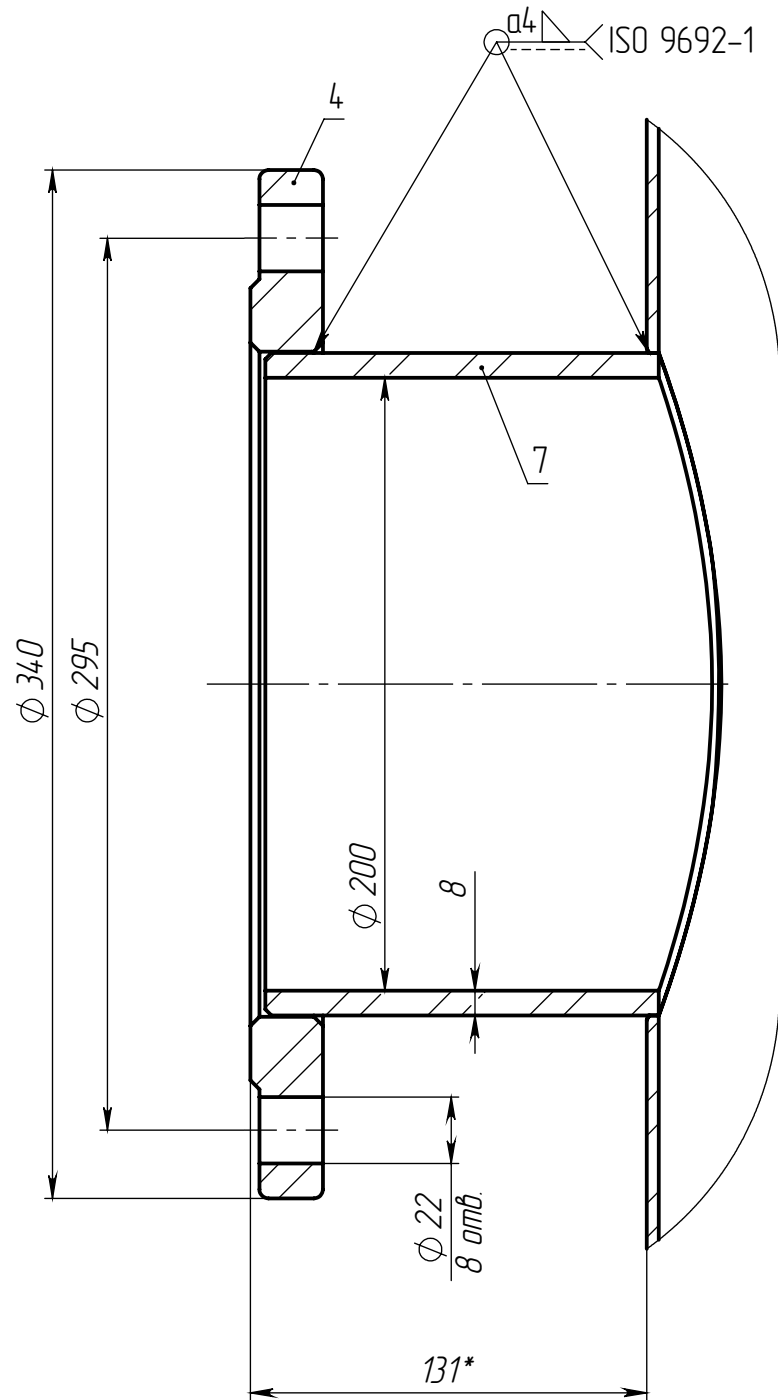
Відповідальна організація Кафедра МАХНВ	Технічне узгодження Новохат О.А.	Розробник документа Антончик Е.Е.	Документ затверджено Коник А.В.		Масштаб 1:10
Власник документа КПІ ім. Ізоря Сікорського		Вид документа Плакат		Статус документа	
		Назва, додаткова назва Дефлекатор		ЛН21.01.101.000	
		Інд. змін.	Дата видання	Мова UA	Аркуш A3



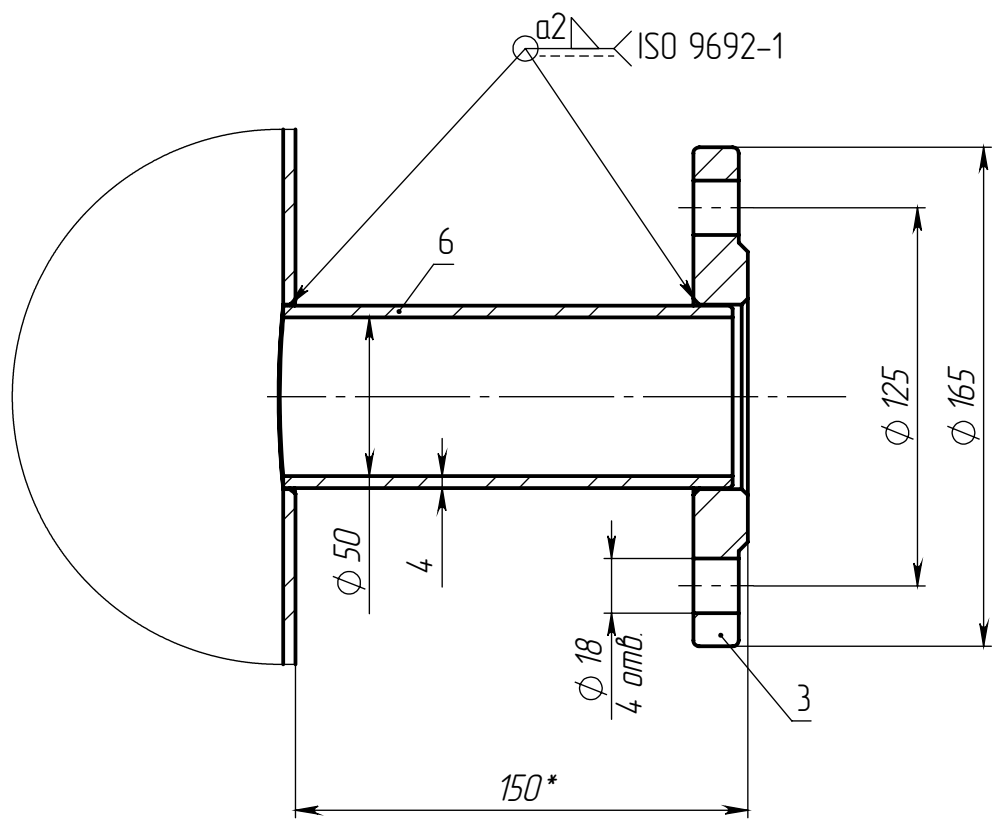
Ж (1 : 2,5)



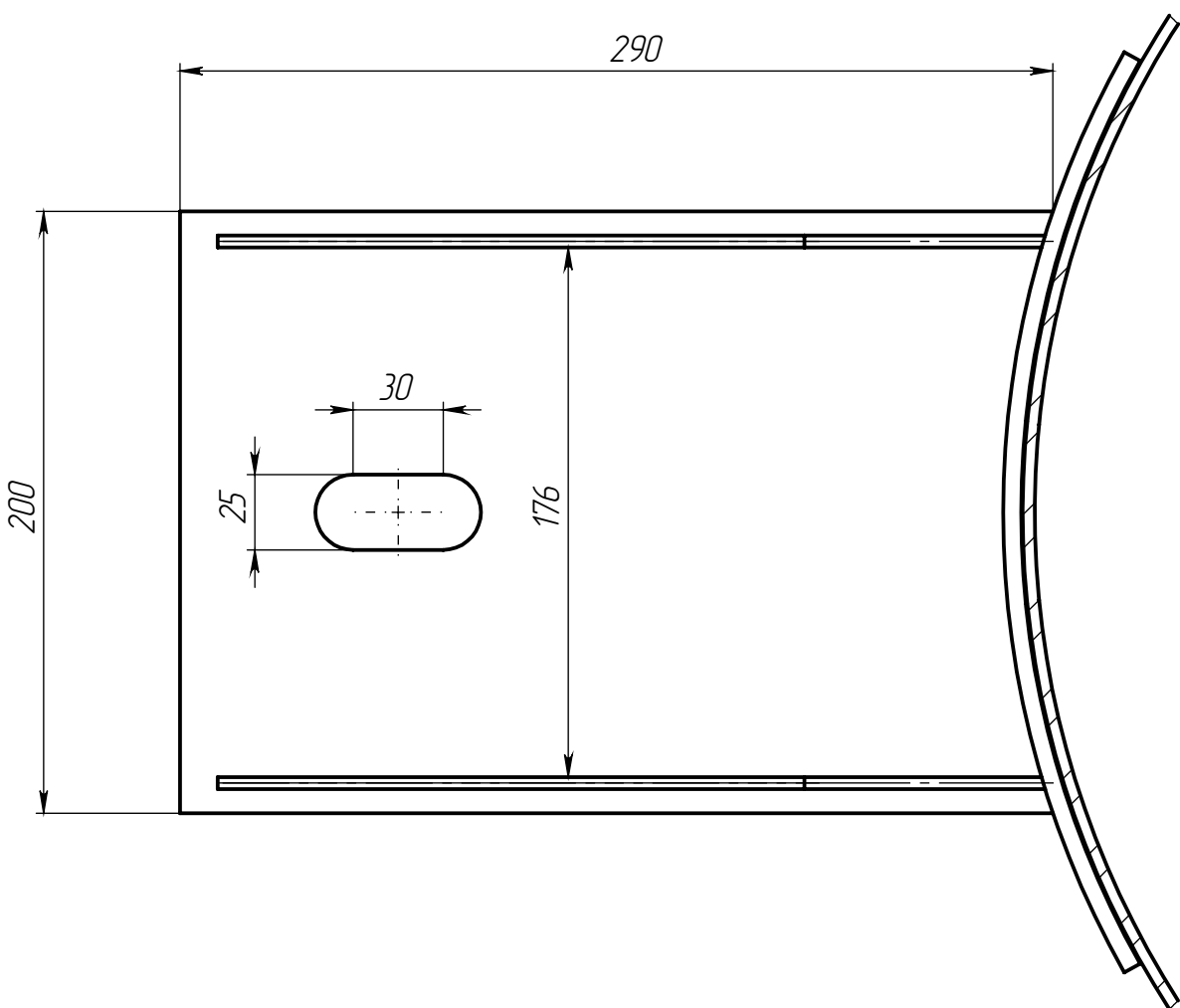
Е (1 : 2,5)



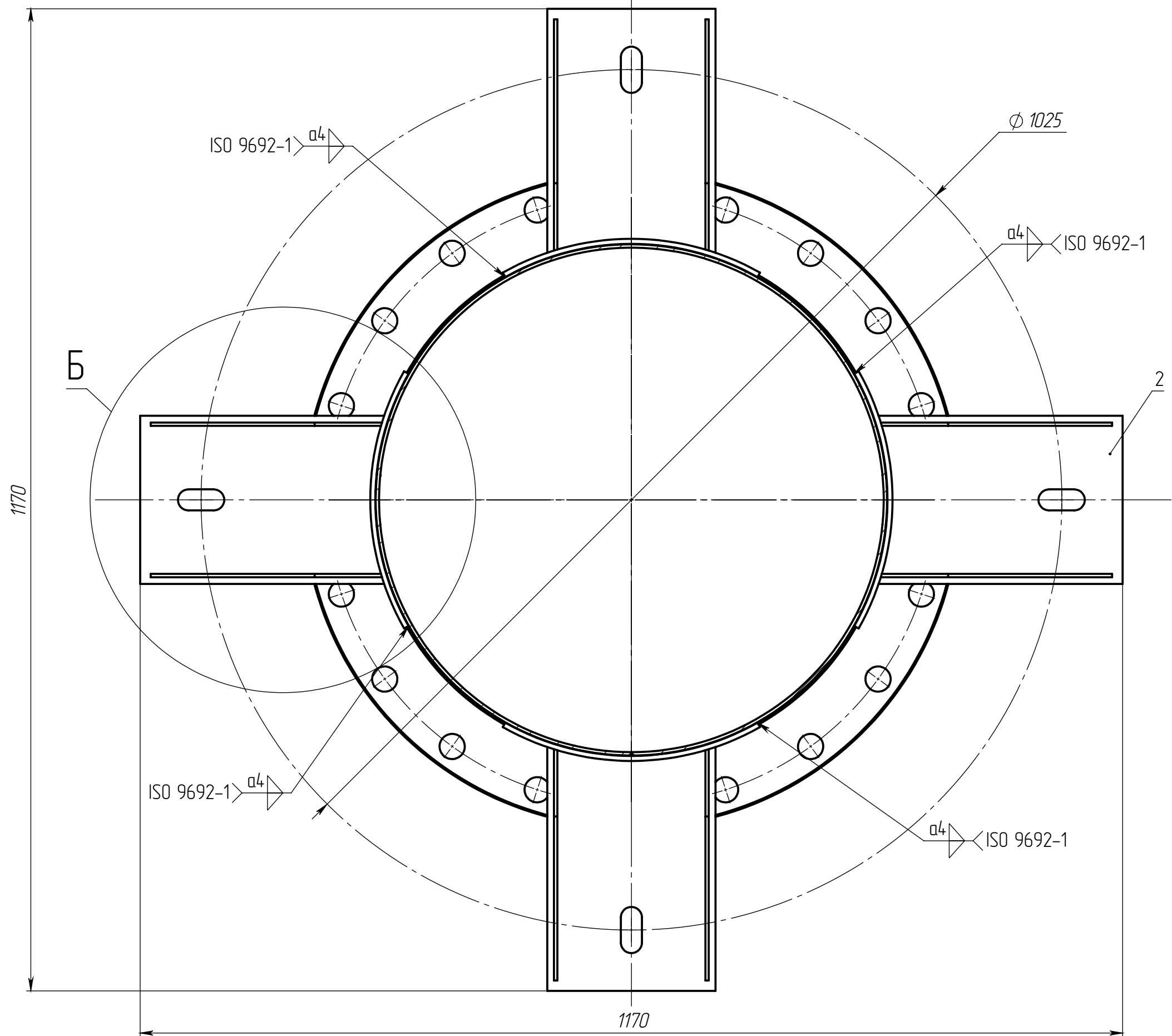
В,Г,Д (1 : 2,5)



Б (1 : 2,5)

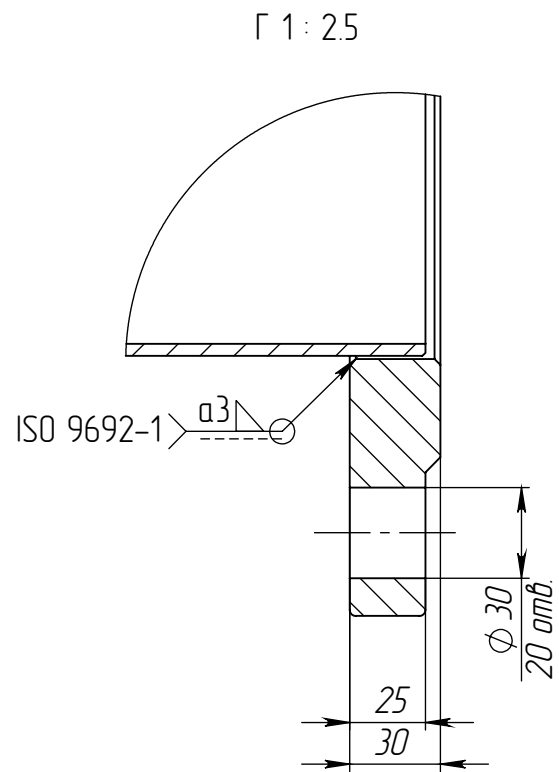
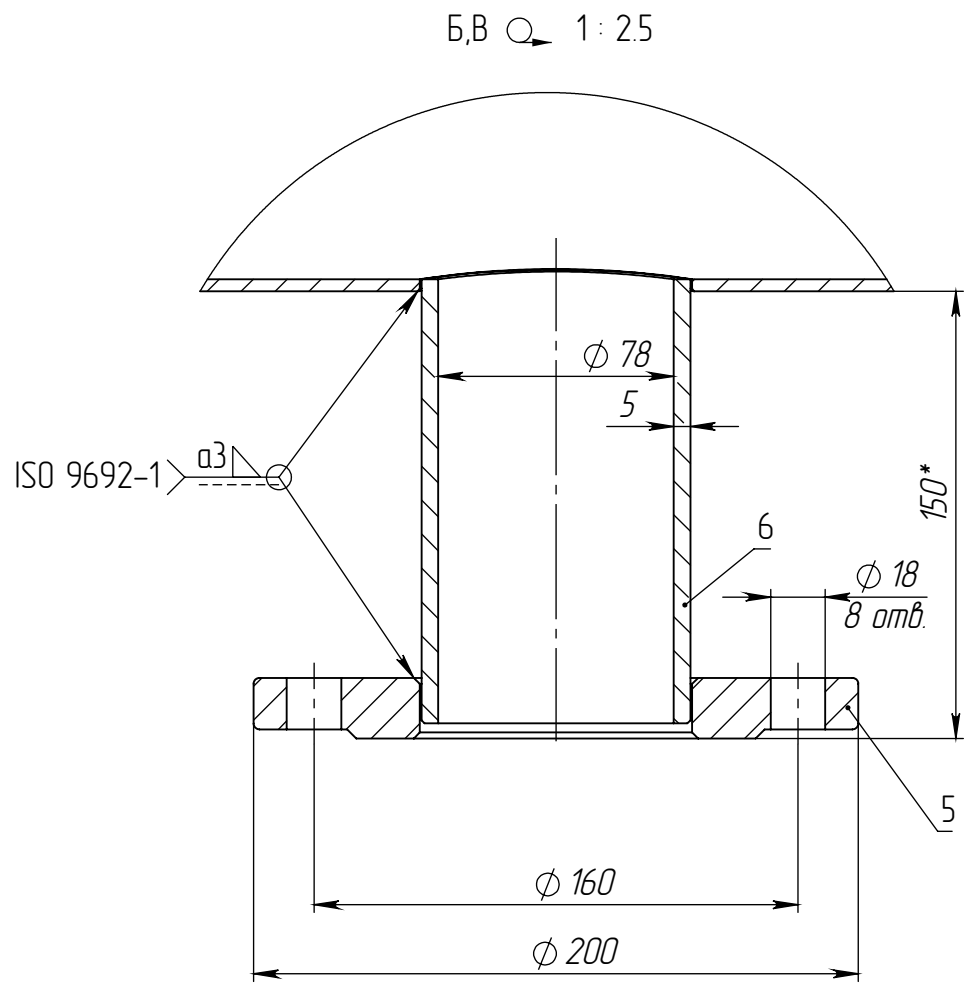
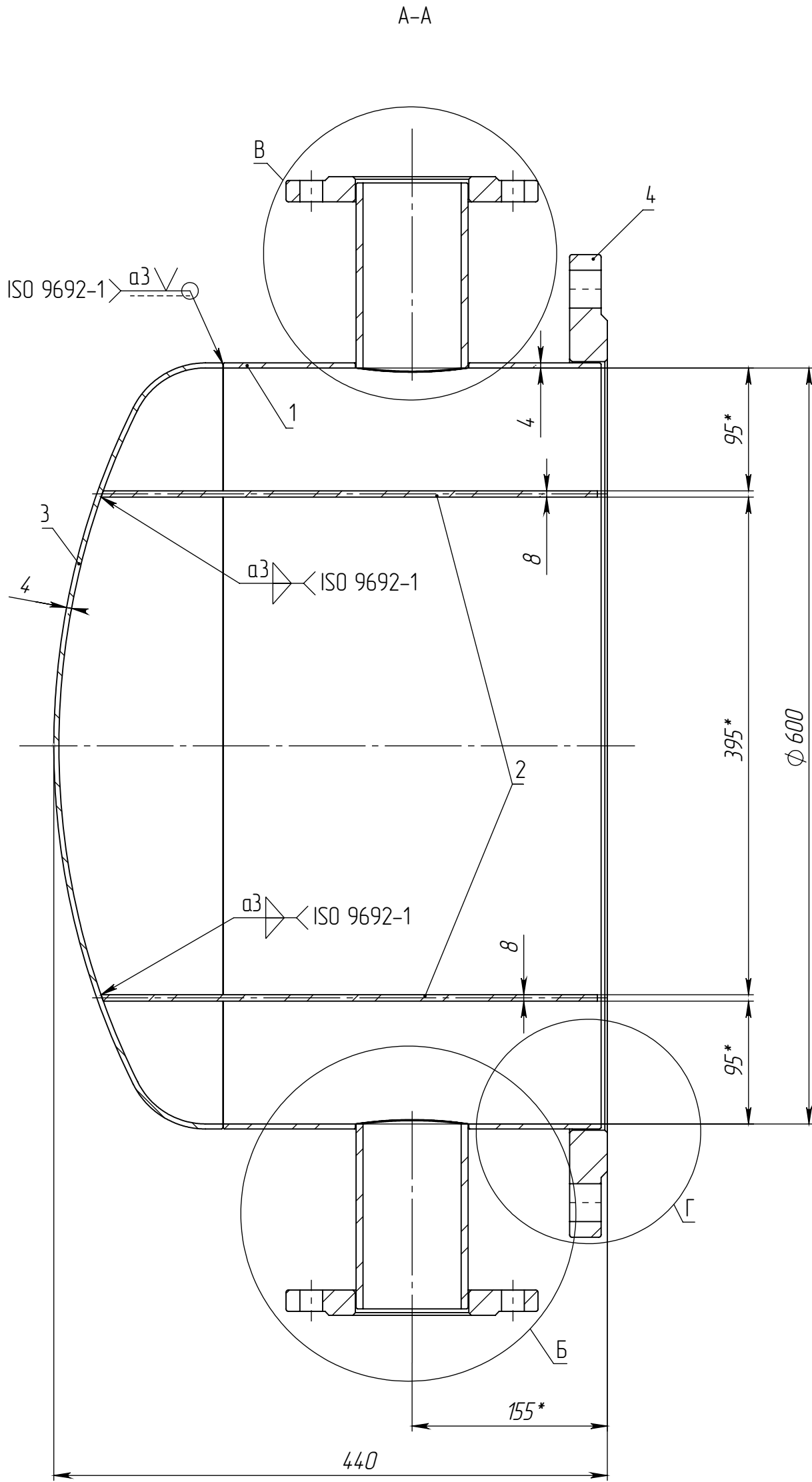
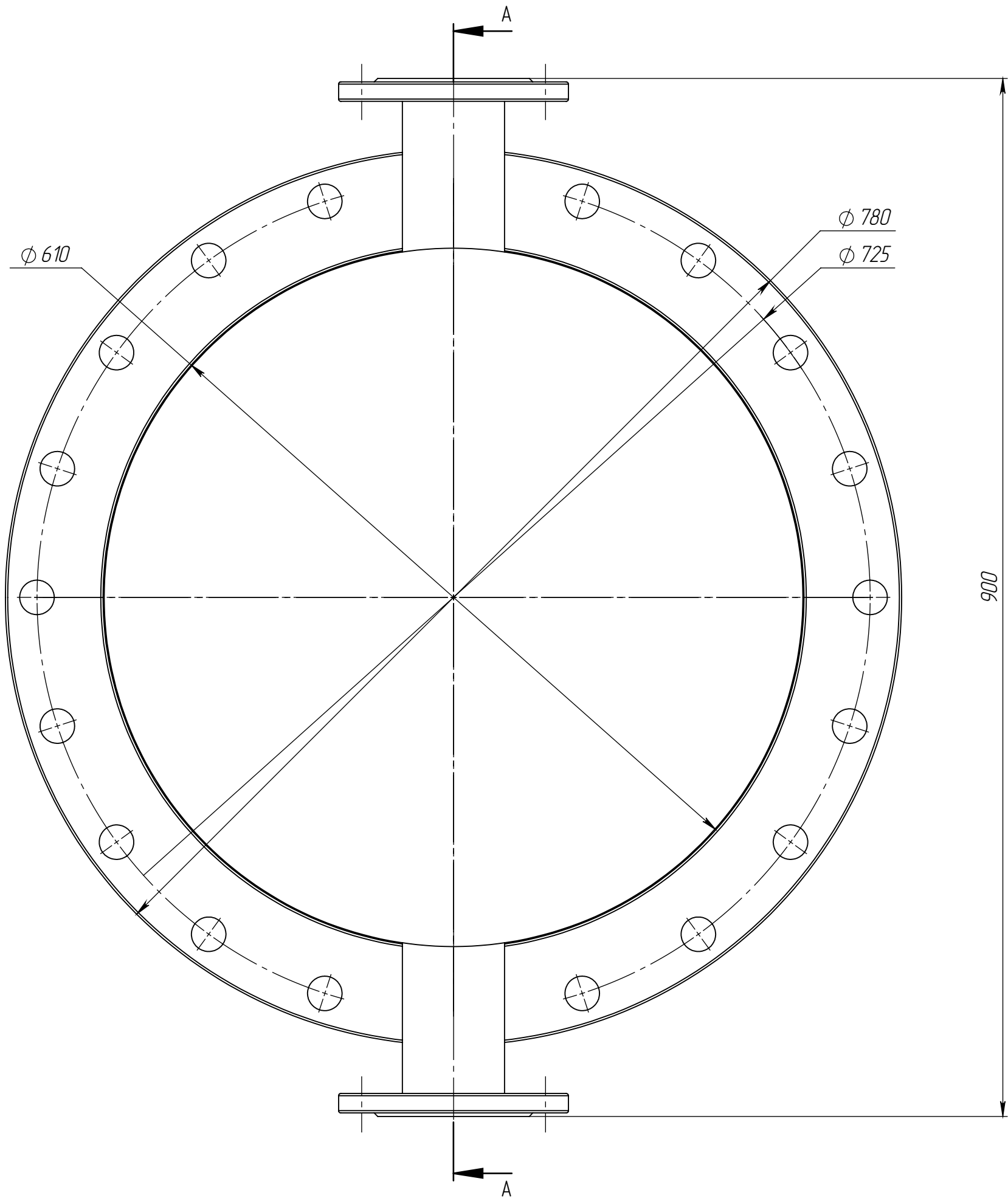


А-А (1:5)



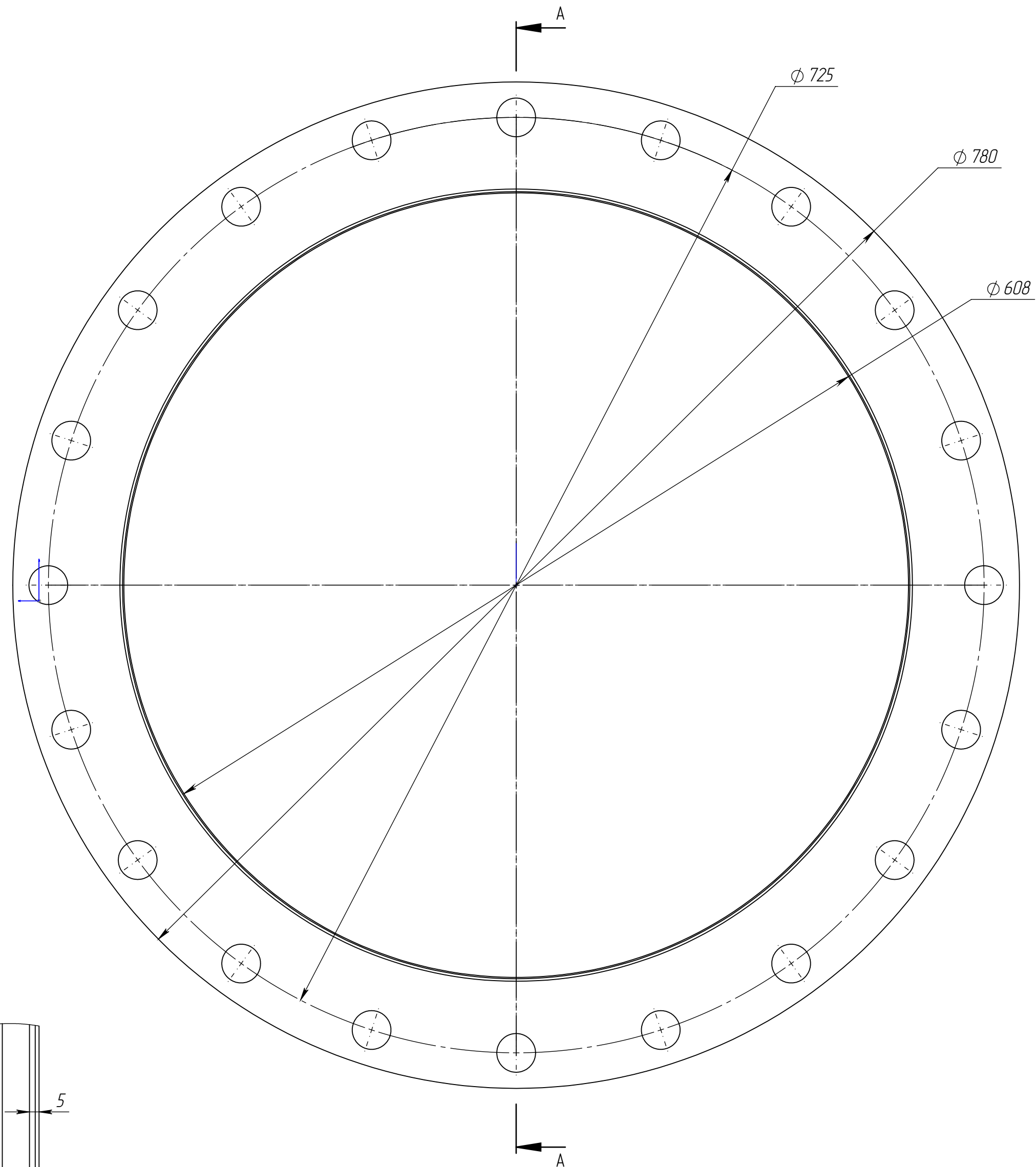
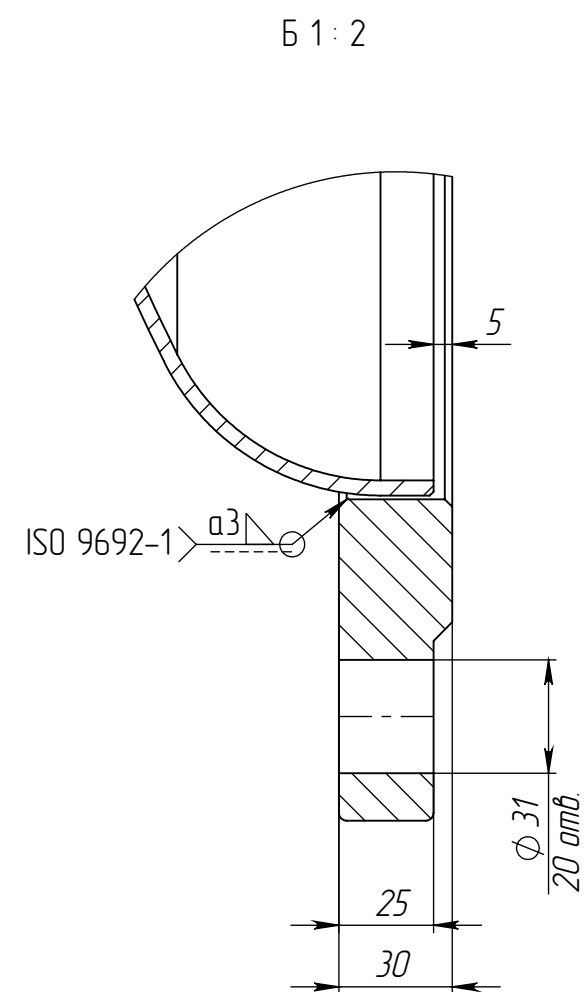
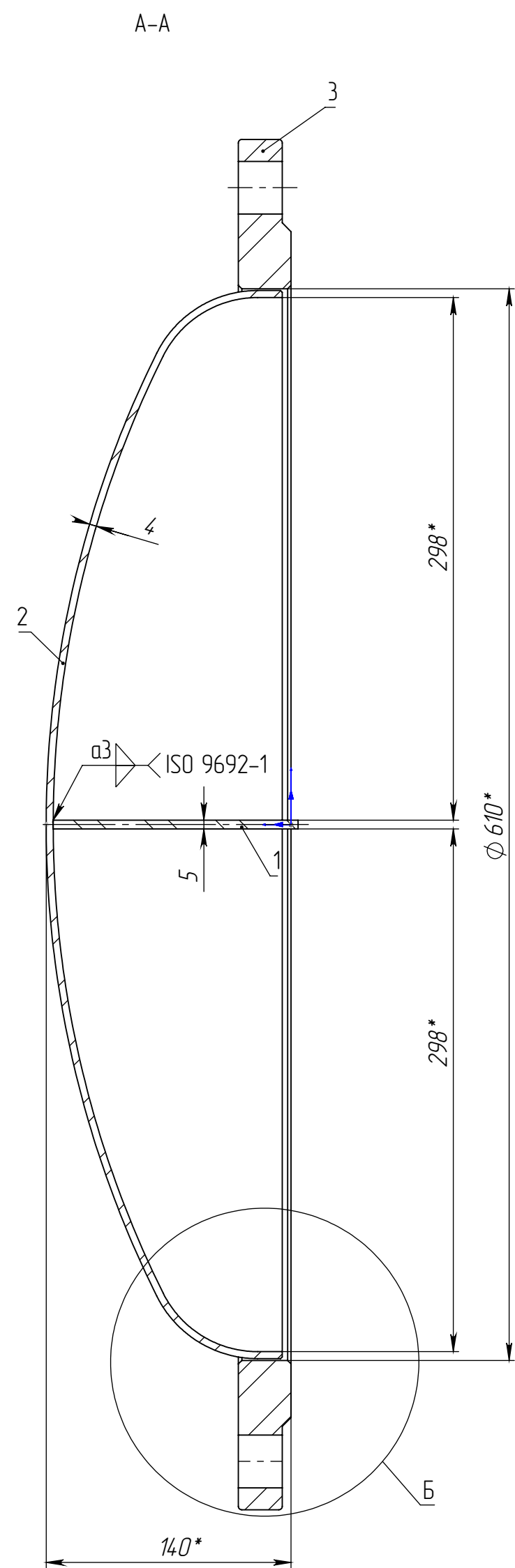
ТЕХНІЧНІ ВИМОГИ				
1	Розміри для довідок			
2	Основний матеріал – сталь 12Х18Н10Т			
3	Зварні шви контролювати рентгенопробічнюванням			
4	Граничне відхилення осей штуцерів від нормального положення ±3 мм			
Відповідальна організація Кафедра МАХНВ		Технічне узгодження Набохат О.А.	Розробник документа Антончик Е.Е.	Документ затверджено Коник А.В.
Власник документа КПІ ім. Ізгоря Сікорського		Вид документа Складальний Креслення	Статус документа ЛН2101101001 СК	
Назва, додаткова назва Корпус		Ід. зм.	Дата видання	Мова UA
		Архив	A1	

Поз-нака	Позначення	Посилання	Кіль.	Матеріал	Примітка
	<u>Документація</u>				
	Складальний кресленик	ЛН21.01.101.001 СК			
	<u>Складальні одиниці</u>				
1	Обличайка	ЛН21.01.201.101	1		
2	Опора апарата	ЛН21.01.201.102	1		
	<u>Стандартні вироби</u>				
	Фланець				
3	Фланець плоский DN 50		3		DIN 1092-2 type 11
4	Фланець плоский DN 200		1		DIN 1092-2 type 11
5	Фланець плоский DN 600		1		DIN 1092-2 type 11
	Труба				
6	Труба DN 50		3		DIN EN 10216-2
7	Труба DN 200		1		DIN EN 10216-2
ВІДПОВІДАЛЬНА ОРГАНІЗАЦІЯ Кафедра МАХНВ		ТЕХНІЧНЕ УЗГОДЖЕННЯ Новохат О.А.	РОЗРОБНИК ДОКУМЕНТА Антончик Е.Е.	ДОКУМЕНТ ЗАТВЕРДЖЕНО Коник А.В.	
ВЛАСНИК ДОКУМЕНТА КПІ ім. Ізгоря Сікорського		ВИД ДОКУМЕНТА Специфікація		СТАТУС ДОКУМЕНТА	
		НАЗВА, ДОДАТКОВА НАЗВА Корпус		ЛН21.01.101.001 СП	
				НД. ЗМН.	ДАТА ВИДАННЯ
				МОВА UA	АРКУШ A4



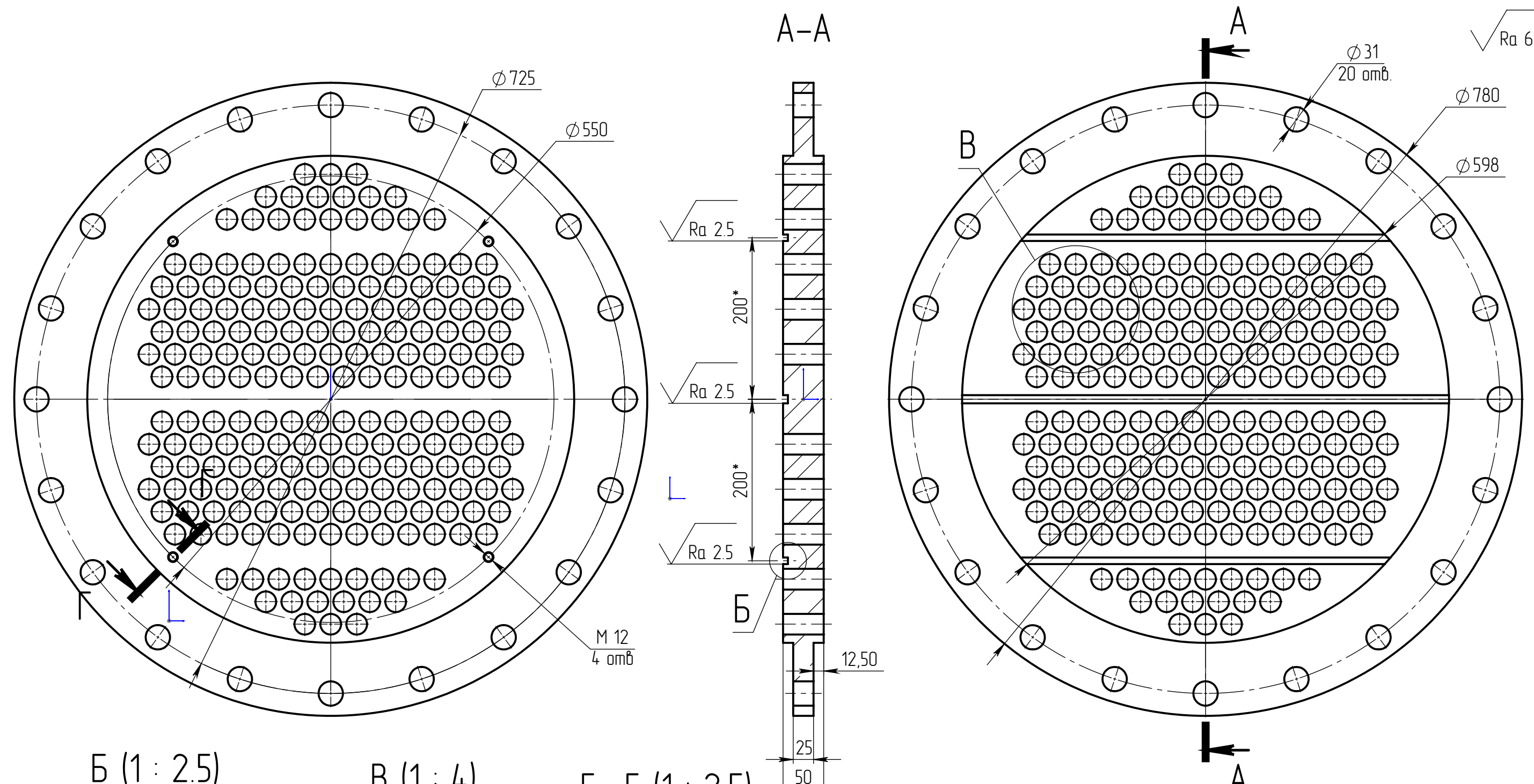
ТЕХНІЧНІ ВИМОГИ				
1	Розміри для довідок, окрім *			
2	Основний матеріал – сталь 12Х18Н10Т			
3	Зварні шви контролювати рентгенопросвічуванням			
4	Граничне відхилення осей штифтів від нормального положення ±3 мм			
Відповідальна організація Кафедра МАХНВ		Технічне узгодження Новохат О.А.	Розробник документа Антончик Є.Є.	Документ затверджено Коник А.В.
Власник документа КПІ ім. Ізгоря Сіорського		Вид документа Складальний креслення		Статус документа
		Назва, додаткова назва Камера розподільча		ЛН21.01.101.003 СК
		Інд. змін.	Дата видання	Мова UA
				Аркуші A2

Поз-нака	Позначення	Посилання	Кіль.	Матеріал	Примітка
	<u>Документація</u>				
A2	Складальний кресленик	ЛН21.01.101.003 СК	1		
	<u>Складальні одиниці</u>				
1	Обличайка	ЛН21.01.201.003			
	<u>Деталі</u>				
2	Перезгородка	ЛН21.01.301.003	2		
	<u>Стандартні вироби</u>				
3	Кришка псевдо-еліптичне		1		DN 600 x 4
	Фланець				
4	DN 600 – PN 6		1		DIN 1092-2 type 11
5	DN 80 – PN6		1		DIN 1092-2 type 11
	Труба				
6	DN 80		2		DIN EN 10216 – 5
Відповідальна організація Кафедра МАХНВ		Технічне узгодження Новохат О.А.	Розробник документа Антончик Е.Е.	Документ затверджено Коник А.В.	
Власник документа КПІ ім. Ізоря Сікорського		Вид документа Специфікація		Статус документа	
		Назва, додаткова назва Камера розподільча		ЛН21.01.101.003 СП	
		Інд. змін.	Дата видання	Мова UA	Аркуш 1



ТЕХНІЧНІ ВИМОГИ									
1	Розміри для довідок, окрім *								
2	Основний матеріал – сталь 12Х18Н10Т								
3	Зварні шви контролювати рентгенопросвічуванням								
Відповідальна організація Кафедра МАХНВ		Технічне узгодження Новохат О.А.		Розробник документа Антончик Е.Е.		Документ затверджено Коник А.В.		Масштаб 1:2,5	
Власник документа КПІ ім. Ігоря Сіорського				Вид документа Складальний кресленик		Статус документа			
				Назва, додаткова назва Кришка розподільча		ЛН2101.101.004 СК			
						Інд. змін.		Дата видання	

[illegible]

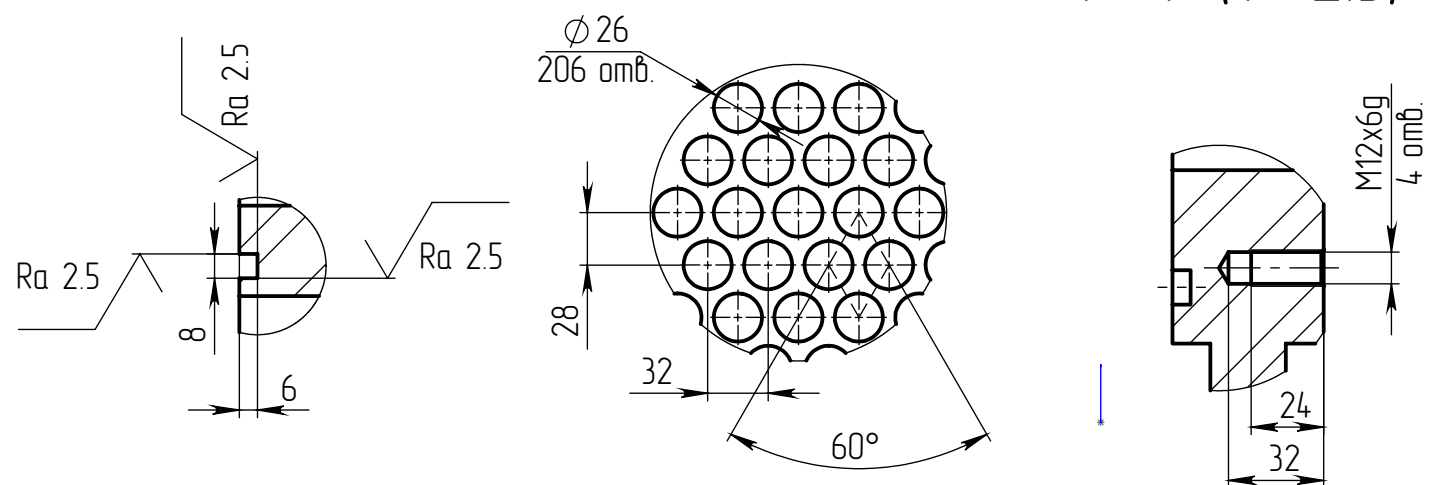


✓ Ra 6.3

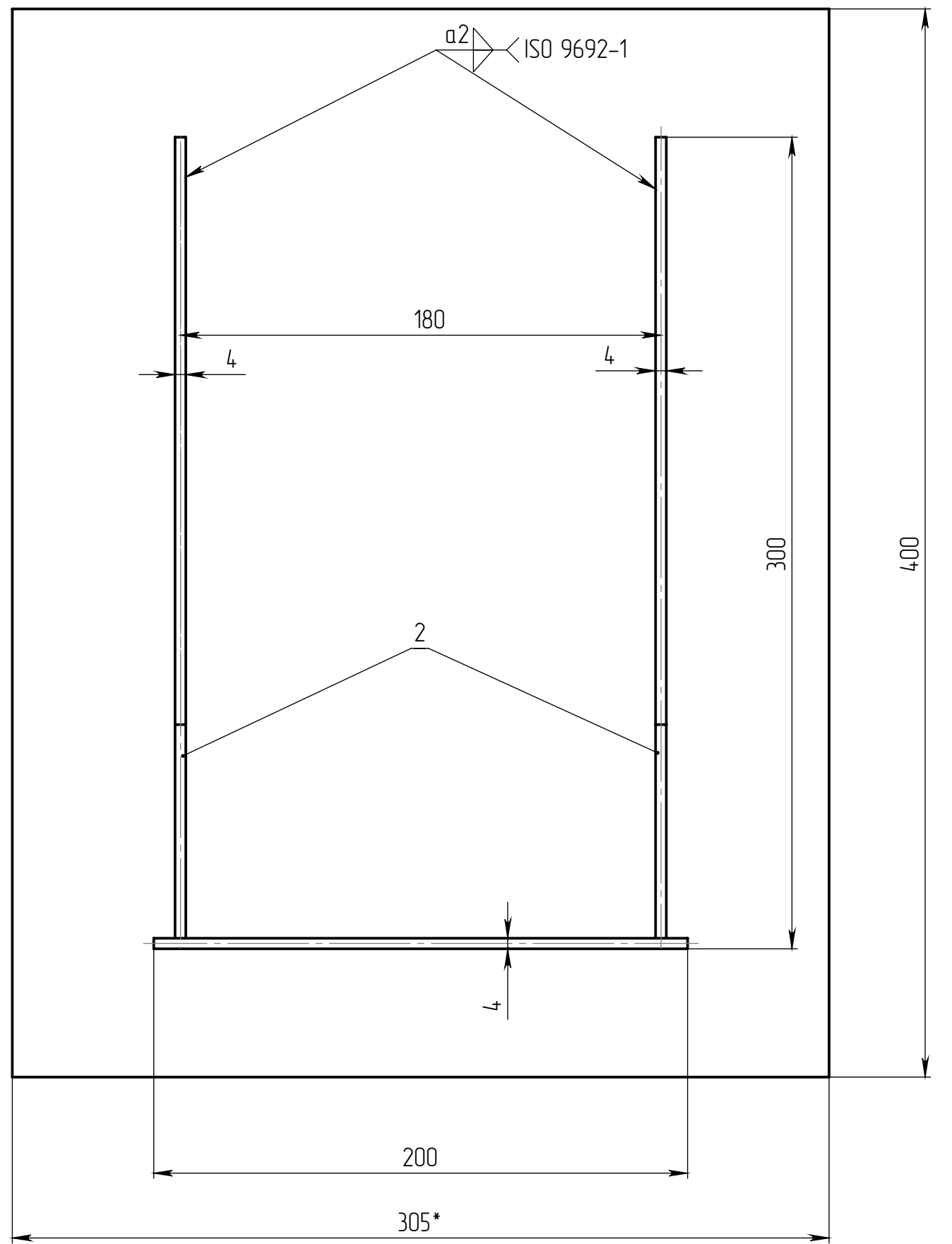
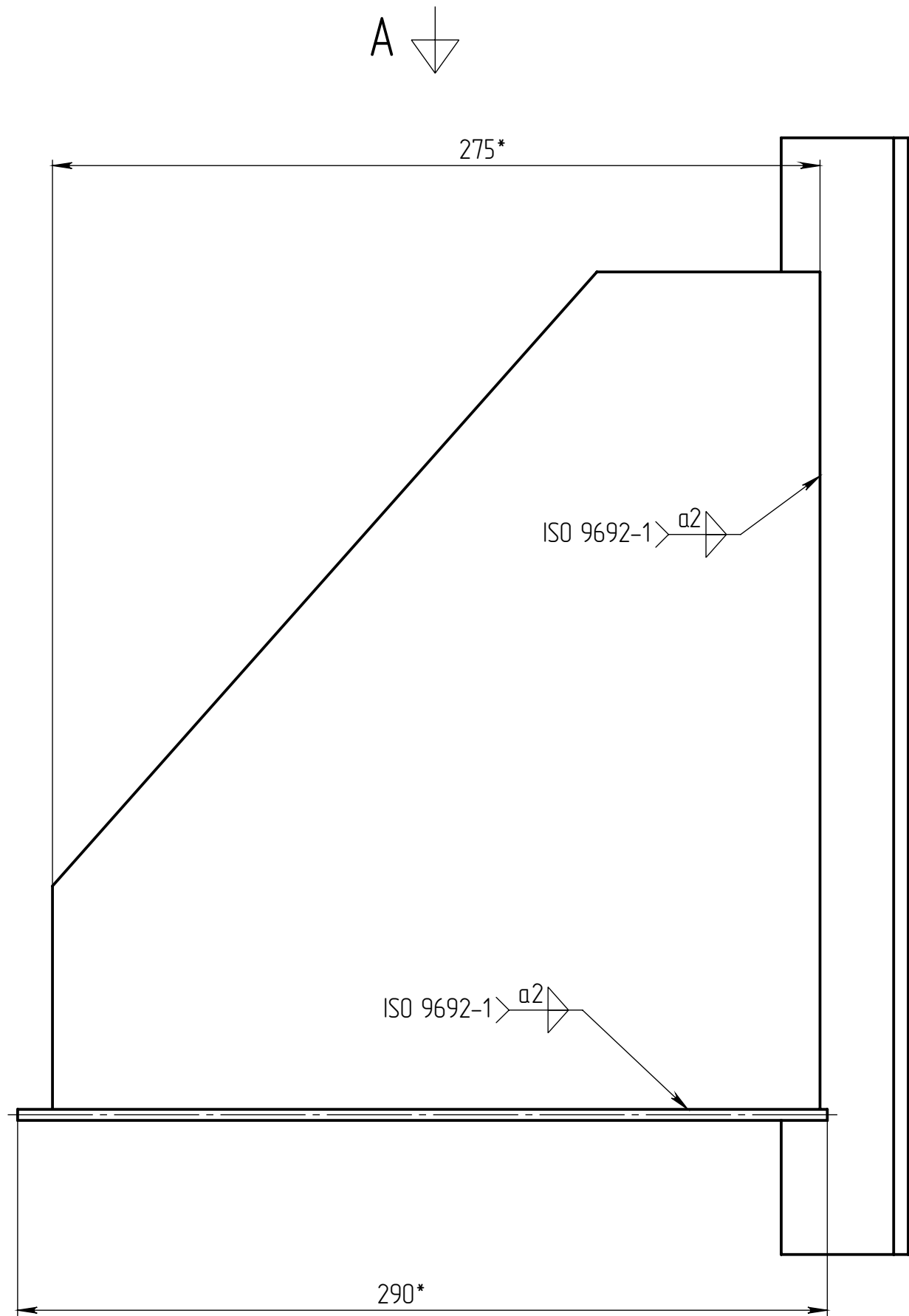
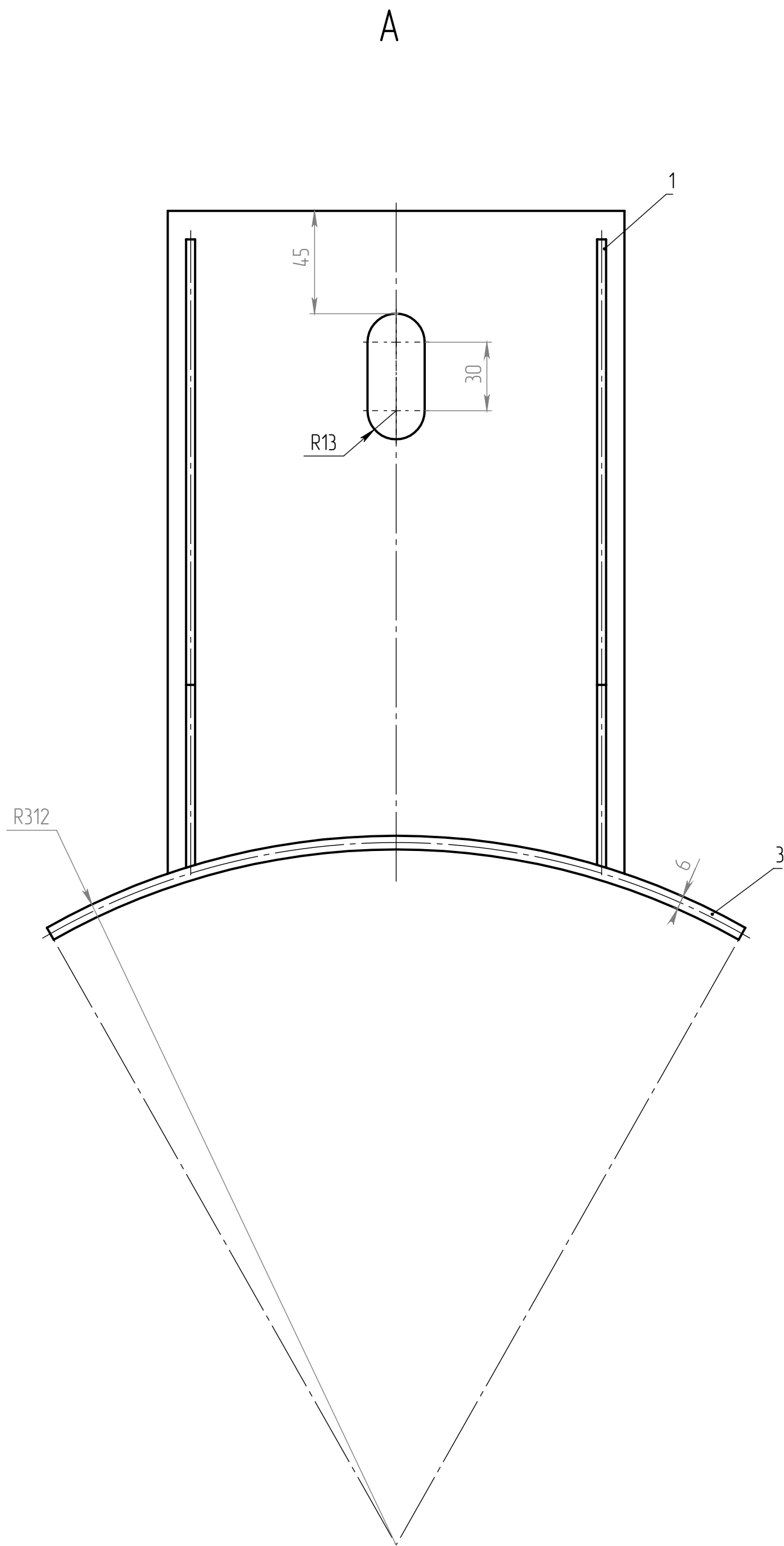
Б (1 : 2.5)

В (1 : 4)

Г-Г (1 : 2.5)



№	Параметр				
1	Граничні відхилення	H14, h14; $\pm \frac{IT14}{2}$			
2	Матеріал	12X18H10T			
Відповідальна організація КАФЕДРА МАХНВ		Технічне узгодження Новохат О.А.	Розробник документа Антончик Е.Е.	Документ затверджено Коник А.В.	Масштаб 1:5
Власник документа КПІ ім. Ігоря Сікорського			Вид документа Кресленник	Статус документа	
			Назва, додаткова назва Трубна решітка	ЛН-21.01.101.006	
		Інд. змін.	Дата видання	Мова UA	Аркуш A3



ТЕХНІЧНІ ВИМОГИ						
1	Розміри для довідок,окрім *					
2	Основний матеріал – сталь 12Х18Н10Т					
3	Зварні шви контролювати рентгенопробіччуванням					
Відповідальна організація КАФЕДРА МАХНВ		Технічне узгодження Новахат О.А.	Розробник документа Антончик Е.Е.	Документ затверджено Каник А.В.		Масштаб 1:2,5
Власник документа КПІ ім. Ігоря Сікорського			Вид документа Складальний креслення		Статус документа	
			Назва, додаткова назва Опора вертикальна		/Н2101.101.005 СК	
					Інд. змін.	Дата видання

[illegible]