

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ**

Інститут (факультет) *Навчально-науковий Інженерно-технічний інститут
ім.акад. І.С. Гулого*

Кафедра *Машин і апаратів харчових та фармацевтичних виробництв*

«До захисту в ЕК»

Директор інституту(декан факультету)

(підпис)

Сергій БЛАЖЕНКО
(ім'я та прізвище)

« ____ » _____ 20__ р.

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

(підпис)

Олександр ГАВВА
(ім'я та прізвище)

« ____ » _____ 20__ р.

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
НА ЗДОБУТТЯ ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ МАГІСТРА**

зі спеціальності *133 «Галузеве машинобудування»*
(код та назва спеціальності)

освітньо-професійної програми *«Інжиніринг харчових та біотехнологічних
виробництв»* на тему

**Модернізація апарату колонного типу для отримання
ін'єкційної води продуктивності 1800 кг/год.**

Виконав: здобувач IV курсу, групи ОХ-4-2

Ющенко Ростислав Юрійович

(прізвище, ім'я, по батькові повністю)

Керівник **Бабанова Олена Ігорівна** _____
(прізвище, ім'я, по батькові повніст (підпис)

Консультанти _____
(ім'я та прізвище)

(підпис)

(ім'я та прізвище)

(підпис)

Рецензент _____
(ім'я та прізвище)

(підпис)

Я як здобувач(ка) Національного університету харчових технологій розумію і підтримую політику університету з академічної доброчесності. Я не надавав(-ла) і не одержував(-ла) незарядженої допомоги під час підготовки цієї роботи. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Здобувач _____
(підпис)

Київ – 2025 р.

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Інститут *Навчально-науковий інженерно-технічний інститут ім. акад. І.С. Гулого*

Кафедра *Машин і апаратів харчових та фармацевтичних виробництв*

Освітній ступінь *бакалавр*

Спеціальність *133 «Галузеве машинобудування»*

(шифр і назва)

Освітня програма *«Інжиніринг харчових та біотехнологічних виробництв»*

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри МАХФВ

проф. Олександр ГАВВА

(власне ім'я і ПРІЗВИЩЕ)

3 червня 2025 року

З А В Д А Н Н Я НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА

Ющенко Ростислав Юрійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи **Модернізація апарату колонного типу для отримання ін'єкційної води продуктивністю 1800 кг/год.**

керівник проекту (роботи) **Бабанова Олена Ігорівна**, ст. викл.

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом закладу вищої освіти від «10» квітня 2025 р. № 218-кв

2. Строк подання здобувачем роботи 30 травня 2025 р.

3. Вихідні дані до роботи

1. *Дистиляційна установка приготування води для ін'єкцій.*

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): *анотація, зміст; перелік умовних позначень, термінів; вступ; порівняльний аналіз технічних рішень поставленої задачі; техніко-економічне, соціальне обґрунтування; характеристика вихідної сировини і готового продукту; опис запропонованого технічного рішення, будова та принцип роботи; вибір конструкційних матеріалів; розрахункова частина; технологічний маршрут виготовлення деталі; вимоги щодо монтажу, експлуатації та ремонту; система управління; заходи щодо охорони праці, екології; висновки; список використаних літературних джерел, специфікація.*

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень):

Загальний вигляд обладнання – 1 лист; Розрізи, Складальні одиниці обладнання – 5 листів; Технологія машинобудування – 5 листів

6. Консультанти розділів роботи

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

7. Дата видачі завдання: «01» жовтня 2024 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ п/п	Назва етапів виконання кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Порівняльний аналіз технічних рішень поставленої задачі	01.04.2025р.	
2	Техніко-економічне, соціальне обґрунтування.	05.04.2025р.	
3	Характеристика вихідної сировини і готового продукту	10.04.2025р.	
4	Опис запропонованого технічного рішення. Будова та принцип роботи.	15.04.2025р.	
5	Вибір конструкційних матеріалів	20.04.2025р.	
6	Розрахункова частина	02.05.2025р.	
7	Технологічний маршрут виготовлення деталі	15.05.2025р.	
8	Вимоги щодо монтажу, експлуатації та ремонту.	17.05.2025р.	
9	Опис системи управління	18.05.2025р.	
10	Заходи щодо охорони праці, екології	20.05.2025р.	
11	Висновки,	22.05.2025р.	
12	Графічна частина: 5 аркушів формату А3	25.05.2025р.	
13	Список використаних літературних джерел	27.05.2025р.	
14	Анотація, зміст	28.05.2025р.	
	Подача ДП на кафедру	30.05.2025р.	

Здобувач _____ *Ющенко РОСТИСЛАВ*

Керівник роботи _____ *Олена БАБАНОВА*

Анотація

Ющенко Ростислав Юрійович. Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня «Бакалавр» за спеціальністю 133 – Галузеве машинобудування **«Модернізація апарату колонного типу для отримання ін'єкційної води продуктивністю 1800 кг/год».**

В роботі модернізовано ділянку відділення краплинно-рідинної фази з чистого пару.

Проведено аналіз технологічних та технічних рішень, в якому розглянуто аналоги установки “Bosch-Pharmatec ” та переваги, які вона пропонує . Розроблено і обгрунтовано варіант конструкції сепаратораційної частини, що забезпечує виготовлення ін'єкційної води якості, що відповідає всім вимогам і стандартам виробництва.

Проведено літературний огляд, розроблена модель процесу дистиляції, розглянуто основні фактори автоматизації.

Проведено економічні розрахунки, які підтверджують доцільність такої модернізації.

Дипломна робота складається з сторінки пояснювальної записки та листів графічної частини.

Ключові слова: *ін'єкція, вода, очищення, водопідготовка, дистиляція, колона.*

Annotation

Yushchenko Rostyslav Yuriiovich. Qualification work for the “Bachelor” degree in specialty 133 - Industrial engineering “**Modernization of a Column-Type Apparatus for the Production of Injection Water with a Capacity of 1800 kg/h**”.

This work focuses on the modernization of the section responsible for separating the droplet-liquid phase from purified steam.

An analysis of technological and engineering solutions has been conducted, including a review of analogous installations such as the “Bosch-Pharmatec” system and the advantages it offers.

A design for the separator section has been developed and justified, ensuring the production of water for injection that meets all quality requirements and industry standards.

A literature review has been carried out, a model of the distillation process has been developed, and key automation factors have been considered. An economic analysis was also performed, confirming the feasibility of the proposed modernization.

Key words: *injection, water, purification, water treatment, distillation, column.*

ЗМІСТ

Вступ.....	6
1. Порівняльний аналіз технічних рішень поставленої задачі.....	8
2. Техніко-економічне обґрунтування.....	14
3. Характеристика вхідного матеріалу і готової продукції.....	15
4. Опис запропонованого технічного рішення. Будова та принцип роботи обладнання.....	17
5. Вибір конструкційних матеріалів.....	21
6. Розрахункова частина.....	22
7. Технологічний маршрут виготовлення деталі.	40
8. Монтаж, ремонт та експлуатація сушильної установки.....	56
9. Системи управління.....	60
10. Заходи з охорони праці.....	63
Висновки.....	65
Список використаної літератури.....	96
Додатки	

Вступ

Вода для ін'єкцій (*лат. Aqua ad iniectabilia*) є основним розчинником у виробництві лікарських засобів для парентерального введення, а також використовується для розчинення чи розведення діючих речовин безпосередньо перед їх введенням. У стерильному вигляді вона повинна бути прозорою, безбарвною рідиною, що не має ані запаху, ані смаку. Згідно з вимогами Державної фармакопеї України, ін'єкційна вода повинна відповідати стандартам, встановленим для дистильованої води, та бути апірогенною.

Отримання води для ін'єкцій *in bulk* здійснюється з питної або очищеної води методом дистиляції згідно з валідованими технологічними процедурами, що включають постійний контроль електропровідності та мікробіологічної чистоти. Виробництво ін'єкційної води відбувається в асептичних умовах, де заборонено проведення будь-яких сторонніх операцій. У технологічному процесі використовують термокомпресійні аквадистилятори або системи зворотного осмосу. Контактуючі з водою елементи обладнання виготовляються з хімічно інертних матеріалів — нейтрального скла, кварцу або відповідних металів.

Однією з ключових проблем у процесі дистиляції є можливість забруднення дистиляту пірогенними домішками, що можуть переноситися мікрокраплями разом із паром до конденсатора. Щоб запобігти цьому, обладнання повинно бути оснащене високоефективними сепараційними елементами, а також регулярно обслуговуватися відповідно до технічного регламенту. Першу порцію дистиляту, отриману після запуску установки, зазвичай утилізують, після чого починають відбір чистого продукту.

У процесі виробництва та зберігання води для ін'єкцій контролюють рівень мікробного забруднення, зокрема кількість життєздатних аеробних мікроорганізмів. Встановлюються попереджувальні та критичні граничні значення (не більше 10 КУО в 100 мл), що дозволяє своєчасно реагувати на відхилення. Крім того, ін'єкційна вода повинна відповідати жорстким нормативам за вмістом

нітратів ($\leq 0,00002\%$), важких металів ($\leq 0,00001\%$) та бактеріальних ендотоксинів ($< 0,25$ МО/мл).

Зберігання та використання води для ін'єкцій in bulk здійснюється в умовах, які унеможливають мікробне або будь-яке інше забруднення. Для цього застосовують замкнені циркуляційні системи, виготовлені з інертних матеріалів, де вода підтримується при температурі 80–95 °C і постійно рухається зі швидкістю 1–3 м/с. До складу системи входять дві ємності з паровим підігрівом, стерилізуючий повітряний фільтр та насос, що забезпечує безперервну циркуляцію. Усі з'єднувальні трубопроводи мають нахил 2–3° для повного зливу при очищенні системи. Конструктивні елементи виготовляються з хімічно стійких матеріалів — спеціальних марок нержавіючої сталі, титану або лабораторного скла.

Найпоширенішим методом отримання ін'єкційної води є багатокорпусна дистиляція. Ключовою частиною технологічної лінії виступає випарна установка, що забезпечує нагрів живильної води до температури пароутворення.

Сучасна фармацевтична технологія та промислова теплотехніка перебувають у стадії активного розвитку, що проявляється у вдосконаленні процесів, зростанні ефективності обладнання, впровадженні нових схемних та конструктивних рішень, а також у поширенні науково обґрунтованих підходів до вирішення інженерних завдань. Ці тенденції чітко простежуються і в сфері тепломасообміну.

У рамках цього дипломного проєкту розглянуто сучасні системи підготовки води, проведено їх техніко-економічний аналіз, а також запропоновано модернізацію п'ятиколонної дистиляційної установки виробництва Німеччини, що дозволяє підвищити продуктивність базової моделі більш ніж на 20%.

1. Порівняльний аналіз технічних рішень поставленої задачі

Система водопідготовки — ключова складова, критично важлива для фармацевтичної галузі. Вимоги до якості води суворо регламентовані та підлягають ретельному контролю відповідних організацій. Отже, виробники обладнання орієнтуються на норми Європейської (Pharm. Eur.5) або американської (USP27) фармакопеї, які стосуються очищеної води чи води для ін'єкцій, або коротко ВДІ.

При проєктуванні установок очищення води для фармацевтичного виробництва визначальними є точний склад вихідної води, типові коливання цього складу, а також інформація про чинники дестабілізації, наприклад, можливе погіршення якості води через надходження іржі. Кожна установка очищення води для фармацевтичного виробництва має бути адаптована під специфіку вихідної води в місці її монтажу.

В останні роки набули поширення мембранні технології у виробництві очищеної води. Завдяки меншій чутливості до змін вхідної води та невисокій різниці в інвестиційних витратах, спостерігається тенденція комбінувати зворотний осмос із дистиляцією.

Класичний іонообмін нині застосовується нечасто для отримання води для фармацевтичних виробництв, переважно лише за вкрай незадовільної якості вихідної води.

Дистиляція – єдиний надійний спосіб отримання очищеної води та води для ін'єкцій.

Існує безліч конструкцій апаратів, які використовувалися раніше та використовуються тепер у мікробіологічній, фармацевтичній, хімічній промисловостях. Простежуючи їхню еволюцію, можна виділити таку послідовність: для виробництва малих обсягів спочатку з'явилися апарати з паровою сорочкою, потім їх замінили змійовикові та горизонтальні трубчасті апарати, де кипіння відбувалося у великому об'ємі зовні кип'ятільних трубок. З

удосконаленням технологій з'явилися компактніші конструкції – вертикальні апарати із сепараційним простором.

Розглянемо деякі з найефективніших та найцікавіших дистилляторів.

Аквадистиллятор з пристроєм для покращення якості дистилляту.

Створення такого пристрою значно підвищує якість дистилляту, продуктивність апарату, скорочує час та поліпшує якість профілактичних ремонтів. Пристрій складається з колектора змінного перерізу, де частина води надходить у випарник по одному патрубку, а інша частина – через трубку меншого діаметра – потрапляє в розширювальну частину колектора, створюючи ежекційну тягу, внаслідок чого через другий патрубок з випарника виносяться утворені під час кипіння осадки. Відбувається постійне очищення води у випарнику. Якість дистилляту поліпшується (вміст солей зменшується до 300%).

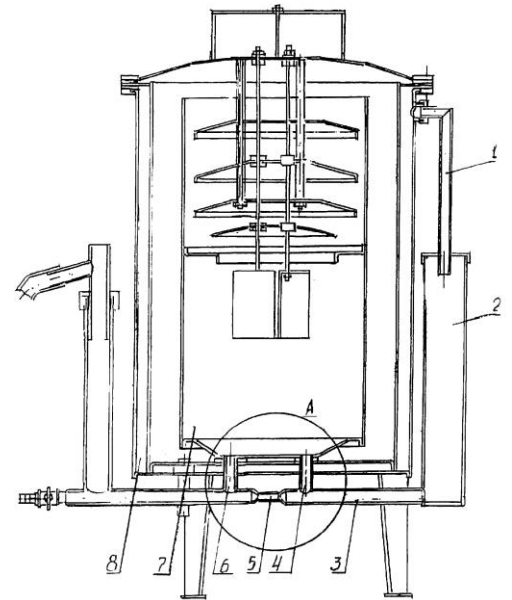


Рис. 1.1 Аквадистиллятор з пристроєм для покращення якості дистилляту

Проте недоліком таких апаратів є те, що з часом роботи, внаслідок кипіння у випарнику відбувається відкладення шламу від солей, які містяться у проточній воді, підвищується ступінь зносу електродів. Частина хімічних елементів виносяться паром та потрапляють у дистиллят, погіршуючи його якість.

Режими роботи апарату погіршуються, продуктивність падає. Тому часто потрібна розбирання апарату для профілактичного чищення.

Дистилятор.

Використання дистильованої води в таких установках для приготування ін'єкційних розчинів, мікстур та інших лікарських засобів є проблематичним через високий вміст в ній аміаку, який неможливо видалити відомими дистиляторами.

Дистилятор має корпус з порожнистими стінками, які розташовані в корпусі камери випарника з розміщеними в ній сепараційними екранами та електронагрівачами, і камерою конденсації, що сумісна з камерою випарника з датчиком рівня та живильною трубою, яка відрізняється тим, що дистилятор оснащено фільтром, встановленим зовні корпусу на живильній трубі. Фільтр виконаний у вигляді кожуха з розміщеним у ньому картриджем з накопичувачем, що поглинає аміак.

Сутність дистилятора полягає в тому, що постачання дистилятора фільтром дозволяє провести попереднє очищення вхідної води від аміаку до потрапляння її в камеру випарника в результаті селективної сорбції його накопичувача, яким заповнено картридж фільтра.

Недоліком відомого дистилятора є неможливість видалення летючих речовин, наприклад, аміаку, під час дистиляції вихідної водопровідної води. При цьому поведінка дистиляції в умовах замкненого простору дистилятора та висока леткість аміаку призводять до підвищення його концентрації в очищеній воді по відношенню до вхідної. Крім цього, під час експлуатації дистилятора з використанням води з більшим вмістом летючих речовин, зокрема, і заповнення піною парового простору камери випарника, починається викид гарячої води і робота апарата зупиняється.

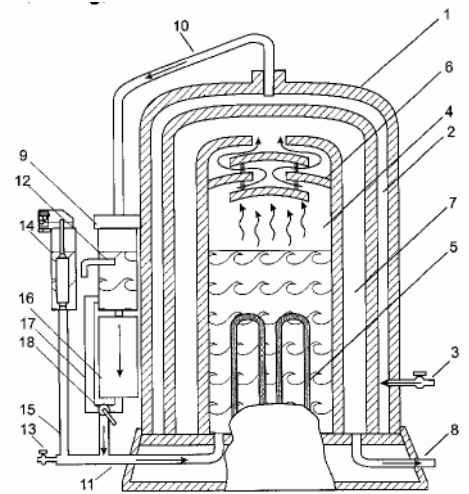


Рис 1.2. Дистилятор Інтерліт

Ультрафільтраційні модулі для виробництва апірогенної води.

Зворотноосмотичні мембрани мають високі показники видалення мікроорганізмів і пірогенів, проте конструкції модулів недостатньо міцні. Таких недоліків не мають ультрафільтраційні модулі. Вимоги до них: вони повинні мати

гарантовану межу пропускання фільтра (Cut-off), не допускається можливість перетікання живильної води у фільтрат у зворотний спосіб, робоча температура (80°C), витримувати дезінфекцію паром (121°).

Ультрафільтраційні мембрани мають асиметричну структуру. При конструюванні установок ультрафільтрації необхідно забезпечити захист від накопичення частинок на поверхні мембран. Це досягається за рахунок промивання, тобто організації потоку крізь поверхню мембрани, що вимиває затримані частинки. При цьому перехресний потік по мембрані повинен бути достатньо високим (тобто концентрат повинен рециркулювати). Окрім цього, в більшості випадків необхідні цикли зворотної фільтрації, при цьому фільтрат проходить через мембрану у зворотному напрямку, щоб видалити осажденний на мембрані матеріал, вимиваючи його з концентратом. Такі цикли промивання тривають декілька хвилин і не вимагають зупинки виробництва фільтрату.

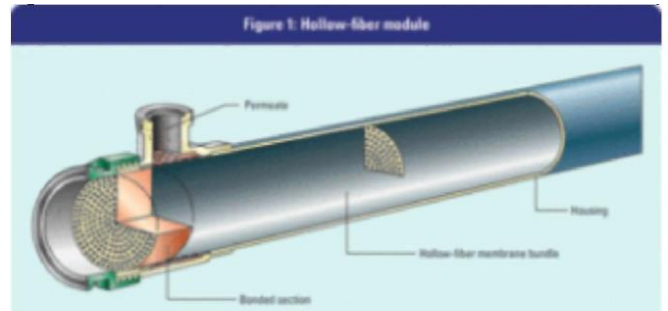


Рис.1.3. Ультрафільтраційний модуль



Рис.1.4. Ультрафільтраційні мембрани

Проте навіть найсучасніші мембрани не дають ефекту, якщо не буде якісної сепарації між фільтром і живильною водою.

Ультрафільтраційна установка, гаряча система. Дозволяє забирати фільтрат безпосередньо на виході з УФ-установки та подавати його в систему розподілення за допомогою насосу, встановленого на лінії. Збільшення температури збільшує продуктивність мембран. Гаряче виробництво має низку переваг: стабільна продуктивність модуля, зниження можливості контамінації, зворотна фільтрація потрібна час від часу, тривалий виробничий цикл між двома стерилізаціями паром.



Рис.1.5. Ультрафільтраційна установка

Ультрафільтрація має ряд переваг, як-от висока надійність, перевірка цілісності, можливість обробки паром та невисокі виробничі витрати. Починаючи з невисокої продуктивності від 500 л/год і вище, ультрафільтрація економічно вигідна, низькі витрати енергії. Проте УФ-установки слід регулярно стерилізувати насиченою паром при 121°C.

Аквадистилятор " Bosch-Pharmatec ". Виробник: Німеччина

Дистилятори " Bosch-Pharmatec " призначені для виробництва чистої, безпірогенної дистильованої води з попередньо обробленої живильної води за допомогою випаровування й конденсації живильної води. При багатоефектному методі енергія, пов'язана з паром, утвореною першою колоною, використовується для нагрівання наступної колони. Ця рекуперація тепла забезпечує значну економію витрат енергії. Частина живильної води, що не випаровується в першій колоні, використовується як попередньо нагріта живильна вода для наступної колони.

Пара, утворена в останній колоні, переважно конденсується охолоджуючим ефектом живильної води, тому потрібна невелика додаткова кількість

охолоджуючої води. Загальновідомий багатоефектний принцип разом із запатентованою колоною " Bosch-Pharmatec" поєднує найефективніші у світі системи для виробництва безпірогенного дистиляту високої якості. Порівняно зі своєю продуктивністю дистилятор "Bosch-Pharmatec" безшумний та малогабаритний.



Рис. 1.6. Дистилятор Bosch-Pharmatec

Переваги, які пропонує рекупераційна дистиляційна установка "Bosch-Pharmatec":

- дуже висока якість дистиляту завдяки ефективному посиленому видаленню забруднень;
- низькі витрати енергії завдяки високій ефективності системи;
- вода не кипить, що означає коротший час нагрівання й вищу якість дистиляту;
- низькі витрати охолоджуючої води, тому що енергія ефективно передається від дистиляту до живильної води;
- проста механічна конструкція без рухомих деталей, що означає безшумну роботу, легке

очищення та довговічність.

Аналізуючи низку установок для мікробіологічного очищення води для приготування ін'єкційних розчинів, можна констатувати, що аквадистилятор "Bosch-Pharmatec" в конструктивному плані – найкращий. Простота конструкції, продумана система заощадження енергії та висока продуктивність при невеликих габаритах забезпечують позицію лідера серед дистиляторів у фармацевтичній промисловості.

2. Техніко-економічне обґрунтування

Удосконалення конструкцій теплообмінного обладнання спрямоване, зокрема, на збільшення поверхні теплообміну або на створення турбулентного режиму руху теплоносія в апараті — часто ці підходи поєднуються. Застосування таких інженерних рішень дозволяє суттєво підвищити ефективність теплопередачі, збільшуючи коефіцієнт тепловіддачі у два та більше разів.

Проте інтенсифікація процесу пароутворення у колонах, що використовуються для отримання води для ін'єкцій, супроводжується підвищеним ризиком переносу пірогенних домішок разом із краплями пари в дистиллят. Такий ефект є критично небажаним у фармацевтичному виробництві, де особливо суворі вимоги до якості кінцевого продукту. Саме тому розробка нової, більш ефективної конструкції газорідного сепаратора має важливе значення, оскільки дозволяє мінімізувати ризик контамінації й забезпечити належний рівень чистоти дистилляту при зростанні продуктивності.

Основне завдання цього дипломного проєкту — знайти конструктивно простий та ефективний спосіб уловлювання крапель у зоні сепарації.

Запропоноване конструктивне рішення сепаратора демонструє значно вищу ефективність відділення рідкої фази від парової у порівнянні зі стандартними аналогами, не створюючи при цьому суттєвого гідродинамічного опору. Завдяки цьому стає можливим підвищити продуктивність роботи апарата без втрати якості дистилляту, що позитивно впливає на загальну економічну ефективність обладнання. Відповідні розрахунки та показники будуть наведені у цьому розділі.

3. Характеристика вхідного матеріалу і готової продукції

Вода для ін'єкцій (лат. *Aqua ad iniectabilia*) є базовим розчинником, який застосовується у виробництві лікарських засобів для парентерального введення. Вона також використовується для розчинення або розведення активних фармацевтичних інгредієнтів безпосередньо перед їх введенням пацієнту. У стерильному вигляді ін'єкційна вода має бути прозорою, безбарвною, без запаху і смаку. Згідно з нормами Державної фармакопеї України, вона повинна відповідати вимогам до дистильованої води і не містити пірогенних речовин.

Виробництво води для ін'єкцій *in bulk* здійснюється з питної або очищеної води шляхом дистиляції відповідно до валідованих технологічних процедур. Під час виробництва постійно контролюються електропровідність і мікробіологічна чистота продукту. Всі технологічні операції проводяться в умовах суворої асептики, без сторонніх втручань у виробничий процес. Для отримання ін'єкційної води застосовуються термокомпресійні аквадистилятори або установки зворотного осмосу. Усі елементи обладнання, що контактують з водою, виготовляються з хімічно інертних матеріалів — таких як нейтральне скло, кварц або спеціальні марки сталі.

Однією з основних проблем дистиляційного процесу є можливість потрапляння пірогенних домішок у дистилат разом із краплями пари, що можуть проникнути в конденсатор. Для усунення цього ризику апарати комплектуються високоефективними сепараційними пристроями, які потребують регулярного технічного обслуговування. Початкова порція дистилату після запуску установки не використовується та підлягає утилізації; лише після її відведення здійснюється відбір чистої води.

На етапах виробництва і зберігання води для ін'єкцій здійснюється ретельний мікробіологічний контроль, зокрема за кількістю життєздатних аеробних мікроорганізмів. Встановлені граничні допустимі значення (не більше 10 КУО на

100 мл) дозволяють вчасно виявляти і запобігати відхиленням від нормативних показників. Крім того, ін'єкційна вода має відповідати вимогам щодо вмісту нітратів (не більше 0,00002%), важких металів (не більше 0,00001%) і бактеріальних ендотоксинів (менше 0,25 МО/мл).

Зберігання та транспортування води для ін'єкцій *in bulk* здійснюється в замкнених циркуляційних системах, сконструйованих із хімічно стійких матеріалів. Вода в них безперервно циркулює зі швидкістю 1–3 м/с при температурі 80–95 °С. До складу системи входять дві ємності з паровим нагрівом, стерильний повітряний фільтр і насос для забезпечення циркуляції. Усі трубопроводи монтуються з нахилом 2–3° для забезпечення повного зливу під час санітарної обробки. Конструкційні матеріали включають нержавіючу сталь спеціальних марок, титан і лабораторне скло.

На практиці найпоширенішим способом отримання води для ін'єкцій є метод багатокорпусної дистиляції. Основним елементом такого процесу виступає випарна установка, яка забезпечує нагрівання живильної води до температури кипіння з подальшим відведенням пари.

Інтенсивний розвиток фармацевтичної промисловості та промислової теплотехніки проявляється у вдосконаленні технологій, підвищенні енергоефективності, створенні нових конструктивних рішень і впровадженні науково обґрунтованих методів інженерного аналізу. Ці тенденції яскраво простежуються в області тепломасообміну, що є ключовою складовою процесу отримання ін'єкційної води.

У межах цього дипломного проєкту проаналізовано сучасні системи підготовки води, виконано техніко-економічну оцінку існуючих технологій та запропоновано модернізацію п'ятиколонної дистиляційної установки виробництва Німеччини. Очікується, що запропоноване вдосконалення дозволить збільшити продуктивність базової моделі на понад 20% без погіршення якості продукту.

4. Опис запропонованого технічного рішення. Будова та принцип роботи обладнання

В установці виробництва Bosch-Pharmatec реалізовано багатоступінчасту дистиляцію з рекуперацією та попереднім підігрівом живильної вода.

Дана конструкція забезпечує високий коефіцієнт використання теплоти гріючої пари, високу швидкість випаровування і дистиляції та забезпечує належний рівень ізоляції чистого середовища від технічних речовин та оточуючого середовища, відповідно всіх стандартів.

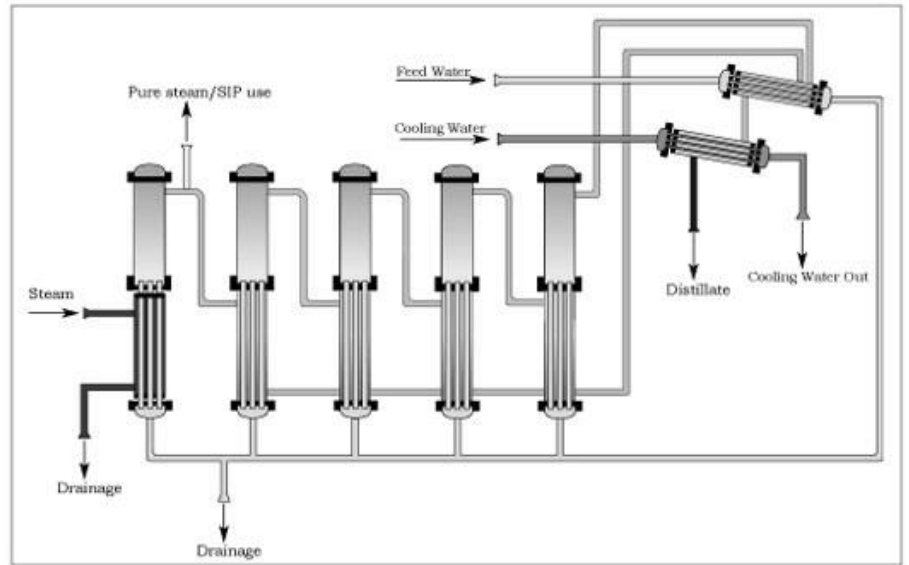
Дистилятори "Bosch-Pharmatec" призначаються для вироблення чистої пари та безпірогенної дистильованої води з попередньо обробленої живильної води за допомогою її випаровування й конденсації.

Використання пару, утвореного першою колоною, для нагрівання наступної колони забезпечує значну економію витрат енергії. Частина живильної води, що не випаровується в першій колоні використовується як попередньо нагріта живильна вода для наступної колони. Пара, утворена в останній колоні, головним чином, конденсується охолодним ефектом живильної води, тому необхідно невелика кількість додаткової води для охолодження.

Дистилятор "Bosch-Pharmatec" можна віднести до малогабаритних та нешумних установок, а його роботу охарактеризувати як безвідказну, навіть, після 10 років експлуатації.

Установка складається з п'яти випарних колон, холодильника-підігрівача та системи трубопроводів, що їх об'єднують. Вода нагрівається за допомогою вертикальних кожухотрубних теплообмінників з природною циркуляцією. Система краплеуловлення представлена двома сепараторами жалюзійного та решітчастого типу. Перший служить для виділення з пару крапель значкої маси, а інший – для контрольного відведення невивареної води у потоках пари.

Частина живильної води, що не випаровується в першій колоні, направляється через дно колони як живильна вода другої колоні. Він повторно нагрівається паром, утвореним у першій колоні. Зазначена пара



направляється в другу колону через теплообмінник, у якому частина його енергії використовується для підігріву живильної води.

Процес багато разів повторюється у всіх колонах. Конденсат нагрівальної пари в другій колоні - дистилят безпірогенний, тому що й у всіх наступних колонах. Остаточо він збирається (д) у конденсаторі, у якому також пара з останньої колони прохолоджується й конденсується вступника живильною водою й додатковою охолодною водою.

Дистилят випускається із дна конденсаторного блоку. Забруднені пари, що супроводжують пара, направляються з конденсатора через отвір у верхній частині конденсатора. Невелика частина живильної води не випаровується по шляху через колони, а збирається на дні останньої колони. Ця вода містить всі забруднення, виділені з живильної води, і направляється на стік через випускний отвір.

Безпірогенний пар є в наявності у факультативному отворі для чистої пари, розміщеному в першій колоні.

Впуск нагрівальної пари здійснюється у верхній частині внутрішнього циліндра, а конденсат випускається із дна внутрішнього циліндра. Живильна вода надходить із резервуара, розміщеного у верхній частині колони, з якої вона протікає вниз по внутрішній поверхні трубок.

Головна частина випаровується по шляху. Живильна вода, що не випаровується, збирається на дні зовнішнього циліндра й випускається по трубі.

В кожній колоні пар, проходячи через групу сепараторів, очищується від крапель, що містять пірогенні речовини. Конструкція попереднього сепаратора передбачає, за рахунок сил інерції, виніс крапель на периферію потоку(на бічну поверхню), під час проходження через систему пластин , що утворюють систему ходів.

ПРИНЦИП РОБОТИ НАСТУПНИХ КОЛОН

Вони відрізняються від першої колони таким чином, що конденсат системи нагрівання являє собою безпірогенний дистилят. Дистилят направляється через наступні колони в конденсатор.

ПРИНЦИП РОБОТИ ОСТАННЬОЇ КОЛОНИ

Безпірогенний дистилят з попередніх і із цієї колони направляється в конденсатор. Частина живильної води, що випаровується, направляється також у конденсатор.

Частина живильної води, що не випаровується, так наз. спускна вода, містить всі забруднення від процесу дистилювання й повинна бути спрямована на стік.

ПРИНЦИП РОБОТИ КОНДЕНСАТОРА

Конденсатор має наступні функції:

- попередній підігрів живильної води
- регулювання температури дистиляту
- конденсація чистої пари з останньої колони

Живильна вода попередньо нагрівається дистилятом і чистою парою. Температура регулюється охолодною водою Чиста пара конденсується живильною водою й охолодною водою.

Комплектний дистилятор "Bocsh-Pharmatec" вика нарий у вигляді горизонтального трьохсередовищного теплообмінника з u-подібними трубками.

Енергія, вироблена пором, ефективно використовується в наступних колонах, тому загальна ефективність системи становить 80 %. Живильна вода нагрівається східчасто - у конденсаторі, а потім у кожній колоні.

Температура й тиск у колонах східчасто збільшуються в напрямку до випуску, починаючи з умов пари в перній колоні до температури, на трохи нижче крапки кип'ятіння при атмосферному тиску біля випускного отвору дистиляту. Температура дистиляту автоматично регулюється за допомогою контролю загального потоку охолодної води, що надходить через конденсатор.

Оригінальний метод по видаленню пірогенів, що використовується в багатоступінчатій установці, заснований на повному відділенні очищеної води від пари, що генерується. Розроблена система дозволяє відділяти краплі води від пари, що генерується за рахунок гравітаційного осадження, що можливо тільки при низькій швидкості проходження. Далі застосовується ще сепарація.

В багатоступінчатому дистиляторі відсутні будь-які рухомі частини і механізми, що позитивним чином впливає на рівень шуму, надійність експлуатації та простоту обслуговування.

Пропонується змінити стандартний попередній краплеуловлювач на більш ефективний жалюзійного типу, з спеціальним профілем пластин, що дозволить покращити відведення рідкої фази з газорідної суміші, за рахунок чого, отримаємо додатковий потенціал для інтенсифікації процесу випаровування та збільшення економічної ефективності роботи устаткування.

5. Вибір конструкційних матеріалів

Вибираємо матеріали для деталей і вузлів дистиляційної установки приготування води для ін'єкцій (таблиця 5).

Таблиця 5

Вибір конструкційних матеріалів деталей дистиляційної установки приготування води для ін'єкцій

Деталь	Матеріал
Корпус колони	Сталь нержавіюча 12X18Н10
Фланець	Сталь нержавіюча 12X18Н10
Патрубок	Сталь нержавіюча 12X18Н10
Корпус (робоча камера) царги Гідрозатвор Клапан Підвіска	Сталь нержавіюча, загартована 12X18Н10
Вікно	Скло
Барботер	Сталь нержавіюча 12X18Н10

6. Розрахункова частина

Гідродинамічний та тепловий аналіз

Тепловий розрахунок випарної установки здійснюється з метою визначення її продуктивності $D_{\text{вип}}$ за заданих умов, а також для оцінки коефіцієнта теплопередачі k під час експлуатації. Зменшення значення k свідчить про появу накипу чи інших відкладень на поверхнях нагрівальної секції, тому за його значенням можна робити висновки про технічний стан поверхонь теплообміну.

Розрахунки, які проводяться для отримання значень $D_{\text{вип}}$ та k при певних робочих режимах, мають перевірочний характер. Якщо розробляється новий тип або розмір випарника, тоді виконується повноцінний конструктивний розрахунок. У такому випадку спочатку задаються орієнтовним значенням k , на його основі визначаються геометричні параметри нагрівальної частини та створюється попереднє ескізне креслення. Після цього, як і у перевірочному розрахунку, уточнюється коефіцієнт теплопередачі. Якщо розраховане значення k_p збігається з попередньо прийнятим, або відхиляється не більше ніж на 5–8%, розрахунок вважається завершеним. Якщо ж відхилення перевищує допустиму межу, розрахунок повторюється з оновленими даними.

Під час перевірного розрахунку виконання ескізу конструкції не є обов'язковим, проте необхідно задатися або продуктивністю апарата, або коефіцієнтом теплопередачі, і порівняти їх з розрахунковими результатами. Якщо ці значення збігаються, вони вважаються достовірними.

У випадках, коли продуктивність випарника можна визначити експериментально, коефіцієнт теплопередачі також можна обчислити безпосередньо. Проте, щоб оцінити, наскільки отримане значення k відрізняється від теоретично можливого при чистих поверхнях теплообміну, необхідно провести повний тепловий і гідродинамічний аналіз.

Таким чином, методики конструкторського та перевірного розрахунків мають незначні відмінності. У нашій роботі буде застосовано наступну послідовність виконання теплового розрахунку випарника за заданими умовами:

тиск гріючої пари дорівнює $p_{gp} = 0,4$ МПа;

тиск вторинної пари становить $p_{em} = 0,33$ МПа;

продуктивність апарата складає $D = 300$ кг/год;

продувка $P_{np} = 2$ %.

У зазначених умовах сумарна теплова енергія, що передається первинною парою, дорівнює:

$$Q = D_{em} \cdot (i''_{em} - i'_{em}) + D_{em} \cdot (1 + P_{np} / 100) \cdot (i'_{em} - i'_e) = \\ = \frac{300}{3600} \cdot (2737,2 - 419) + \frac{300}{3600} \cdot \left(1 + \frac{2}{100}\right) \cdot (419 - 377) = 200,1 \cdot 10^3 \text{ Дж/с}, \quad (5.1)$$

де $i_{em} = 377$ кДж/кг – ентальпія живильної води, що подається у випарник;

$i'_{em} = 419$ кДж/кг – ентальпія води за умов температури насичення;

$i''_{em} = 2737,2$ кДж/кг – ентальпія вторинної пари.

Розрахунок площі теплообміну здійснюється за формулою:

$$A_{m.em} = \frac{Q}{\Delta t_e \cdot k} = \frac{200,1}{13,1 \cdot 2,4} = 6,67 \text{ м}^2, \quad (5.2)$$

де різниця температур між гріючою та вторинною парою дорівнює:

$$\Delta t_e = t_{gp} - t_{em} = 151,1 - 138 = 13,1^\circ\text{C}. \quad (5.3)$$

Для випарників цього типу коефіцієнт теплопередачі зазвичай знаходиться в діапазоні 2,2–2,5 кВт/(м²·°C). У подальших розрахунках приймемо значення $k = 2,4$ кВт/(м²·°C), обчислене по внутрішній поверхні труб теплообмінної секції апарата. Ескіз конструкції нагрівальної секції із зазначеними розмірами теплообмінної поверхні, а також схема циркуляції у робочому контурі установки подані на рисунку 6.1.

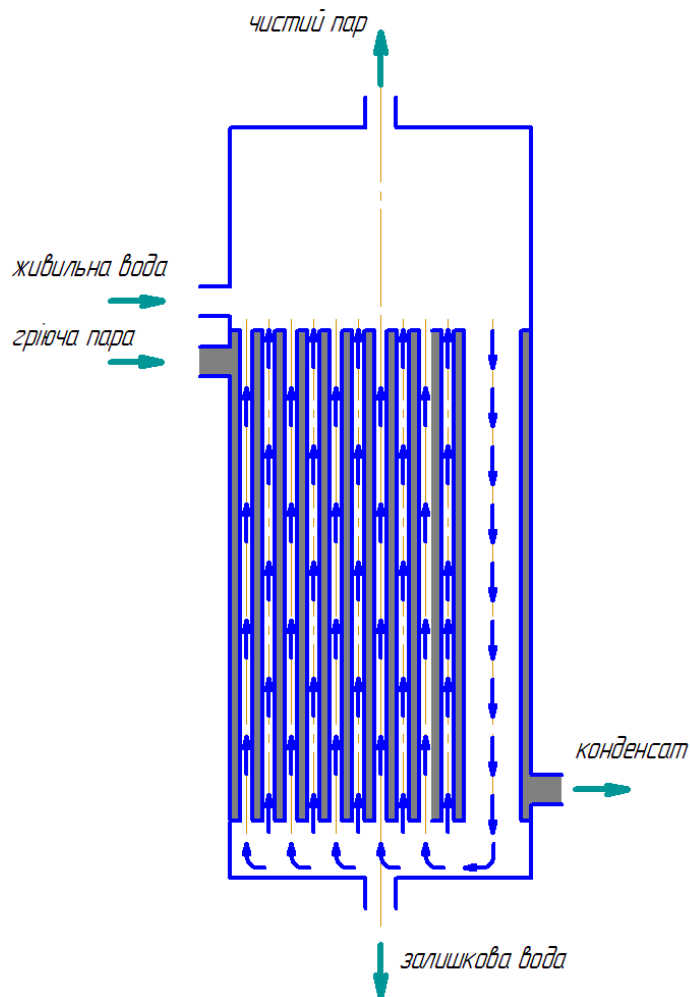


Рис.5.1 Ескіз гріючої секції і схема циркуляції

Нагрівальна секція сформована з 270 трубок розміром 14x1 мм та довжиною 1,1 метра. Під час роботи випарника теплообмін відбувається вздовж довжини труби:

$$L_{акт} = \frac{A_{т.вн}}{\pi \cdot d_{вн} \cdot z} = \frac{6,67}{\pi \cdot 0,012 \cdot 270} = 0,66 \text{ м}, \quad (5.4)$$

де $d_{вн} = d - 2 \cdot \delta = 0,014 - 2 \cdot 0,001 = 0,012$ м – внутрішній діаметр труби; $z=270$ – кількість труб гріючої секції.

Переходимо до виконання теплового розрахунку. Для визначення розрахункового значення коефіцієнта теплопередачі k , необхідно попередньо обчислити коефіцієнт тепловіддачі α_1 — від конденсованої пари до зовнішньої поверхні труби, а також α_2 — від внутрішньої поверхні труби до води, що кипить

у трубах гріючої секції. Значення α_1 може бути встановлене безпосередньо, тоді як для визначення α_2 спочатку потрібно розрахувати швидкість циркуляції води ω_0 всередині труб нагрівального контуру.

6.1.1. Обчислення коефіцієнта тепловіддачі від конденсованої пари до поверхні стінки

Згідно з даними С.С. Кутателадзе [5], у випадку ламінарного режиму течії конденсатної плівки середнє значення коефіцієнта тепловіддачі визначається за наступною формулою:

$$\bar{\alpha} = 1,18 \cdot \lambda \cdot \left(\frac{g}{\nu^2} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot \text{Re}^{-\frac{1}{3}} \quad (5.5)$$

У цьому випадку Re — це число Рейнольдса, яке описує характер течії конденсатної плівки по нижній межі охолоджуваної поверхні. Його величина обчислюється за наступною формулою:

$$\text{Re} = \frac{q_{\text{зовн}} \cdot H}{r \cdot \rho_1 \cdot \nu} = \frac{26 \cdot 0,66}{2156 \cdot 916 \cdot 0,2 \cdot 10^{-6}} = 101, \quad (5.6)$$

де $\nu = 0,2 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ - кінематична в'язкість рідини; $H = 0,66 \text{ м}$ – висота теплообмінної поверхні; $q_{\text{зовн}} = 27 \text{ кВт}/\text{м}^2$ – щільність теплового потоку; $r = 2156 \text{ кДж}/\text{кг}$ – теплота пароутворення; $\rho_1 = 916 \text{ кг}/\text{м}^3$ - густина рідини; $\lambda = 68,39 \cdot 10^{-2} \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ - теплопровідність рідини [2].

$$q_{\text{зовн}} = \frac{Q}{A_{\text{т.зовн}}} = \frac{200,1}{7,78} = 26 \cdot 10^3 \text{ Вт}/\text{м}^2, \quad (5.7)$$

$$\text{де } A_{\text{т.зовн}} = A_{\text{т.вн}} \cdot \frac{d_{\text{зовн}}}{d_{\text{вн}}} = 6,67 \cdot \frac{14}{12} = 7,78 \text{ м}^2. \quad (5.8)$$

Перехід від ламінарного до турбулентного режиму течії плівки спостерігається при значеннях Re , яке перевищують критичне — $\text{Re} > \text{Re}_{\text{кр}}$. Для плівкових потоків критичне число Рейнольдса зазвичай приймається рівним 400. Проте, вже при $\text{Re} > 100$, експериментальні результати починають відхилятися від теоретичної

залежності, причому ступінь відхилення зростає зі збільшенням Re [6]. У нагрівальних секціях випарних апаратів процес теплообміну зазвичай відбувається при відносно малих значеннях Re . У таких умовах, коли $Re > 100$, усереднене значення коефіцієнта тепловіддачі можна визначати за формулою [5]:

$$\begin{aligned} \bar{\alpha} &= \lambda \cdot \left(\frac{g}{v^2} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot \frac{0,16 \cdot Pr^{\frac{1}{3}} \cdot Re}{Re - 100 + 63,2 \cdot Pr^{\frac{1}{3}}} = 68,39 \cdot 10^{-2} \cdot \left(\frac{9,81}{(0,2 \cdot 10^{-6})^2} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot \frac{0,16 \cdot 1,164^{\frac{1}{3}} \cdot 101}{101 - 100 + 63,2 \cdot 1,165^{\frac{1}{3}}} = \\ &= 10790 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}) \quad (5.9) \end{aligned}$$

де Pr – критерій Прандтля:

$$Pr = \frac{\mu \cdot c_p}{\lambda} = \frac{184,3 \cdot 10^{-6} \cdot 4,324 \cdot 10^3}{68,39 \cdot 10^{-2}} = 1,165, \quad (5.10)$$

де $\mu = 184,3 \cdot 10^{-6}$ Па·с – коефіцієнт динамічної в'язкості рідини;

$c_p = 4,318$ кДж/(кг·К) – питома теплоємність рідини [2].

Усі теплофізичні характеристики були визначені при температурі грюючої пари $t_{gp} = 151,1^\circ\text{C}$.

У процесі конденсації пари передача теплоти зазвичай не залежить від матеріалу теплообмінної поверхні, за умови, що конденсат рівномірно розподіляється по ній, а сама поверхня є чистою та гладкою. Однак під час експлуатації на трубах утворюється шар оксидів. У такому випадку, зокрема для сталевих труб, коефіцієнти тепловіддачі знижуються. Це пов'язано як із додатковим тепловим опором шару окису, так і з уповільненням руху плівки конденсату, викликаним підвищеною шорсткістю окисленої поверхні. Згідно з даними щодо труб із вуглецевої сталі, які мають тонкий шар відкладень, доцільно застосовувати поправковий коефіцієнт до тепловіддачі, що дорівнює 0,67. З урахуванням того, що під час роботи теплообмінна поверхня піддається окисленню, отримаємо:

$$\alpha_1 = 0,67 \cdot \bar{\alpha}_1 = 0,67 \cdot 10790 = 7230 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}). \quad (5.11)$$

6.1.2. Розрахунок швидкості циркуляції

Спочатку виконуємо визначення швидкості циркуляції при допомозі графоаналітичного методу згідно з нормативною методикою. Суть підходу полягає в тому, що, варіюючи значення швидкості циркуляційного потоку ω_0 , будуємо графіки зміни гідравлічного опору в підвідних трубопроводах і залежності корисного напору від цієї швидкості. Точка перетину побудованих кривих відповідає такому значенню ω_0 , за якого корисний напір повністю компенсує опір, що виникає під час руху води в підвідних лініях.

У подальших розрахунках приймаємо швидкість циркуляції $\omega_0 = 1$ м/с. Необхідно визначити втрати тиску у підвідному сегменті системи при цьому значенні. Загальні втрати включають:

- втрати у зливному трубопроводі;
- втрати у вхідних зонах труб, де ще не відбувається пароутворення.

Площа поперечного зрізу зливної труби складає:

$$A_{mp} = \frac{\pi}{4} \cdot (D_{m.вн})^2 = \frac{\pi}{4} \cdot 0,124^2 = 0,012 \text{ м}^2, \quad (5.12)$$

$$\text{де } D_{m.вн} = D_{m.зовн} - 2 \cdot \delta_m = 0,130 - 2 \cdot 0,003 = 0,124 \text{ м}. \quad (5.13)$$

Швидкість руху води у зливній трубі:

$$\omega'_0 = \omega_0 \cdot \frac{z \cdot 0,785 \cdot d_{вн}^2}{A_{mp}} = 1,0 \cdot \frac{320 \cdot 0,785 \cdot 0,012^2}{0,012} = 3 \text{ м/с}. \quad (5.14)$$

Втрата тиску у зливній трубі при русі води:

$$\Delta p_{з.тр} = \lambda_0 \cdot H_{тр} \cdot \frac{\rho' \cdot \omega_0'^2}{2} = 0,033 \cdot 1,6 \cdot \frac{927,8 \cdot 3^2}{2} = 218,7 \text{ Па}, \quad (5.15)$$

де $\rho' = 927,8$ кг/м³ – масова густина води за температури вторинної пари;

$H_{з.тр} = 1,6$ м – висота труби зливної;

$\lambda_0 = 0,033$ - коефіцієнт тертя [2]:

$$\lambda_0 = \frac{1}{\left(1,74 + 2 \log\left(\frac{r_1}{\delta_1}\right)\right)^2} = \frac{1}{\left(1,74 + 2 \log\left(\frac{62}{0,8}\right)\right)^2} = 0,033, \quad (5.16)$$

де $\delta_1 = 0,8 \cdot 10^{-3}$ м – висота виступів шорсткості.

$r_1 = 0,062$ м – радіус труби зливної,

Втрати тиску на початку та в кінці зливної труби:

$$\Delta p_{\text{ex.с}} = (\zeta_{\text{ex}} + \zeta_{\text{с}}) \cdot \frac{\rho' \cdot \omega_0'^2}{2} = (0,5 + 1) \cdot \frac{927,8 \cdot 3^2}{2} = 6243 \text{ Па}, \quad (5.17)$$

де $\zeta_{\text{ex}} = 0,5$ - коефіцієнт місцевого опору на початку;

$\zeta_{\text{с}} = 1$ - коефіцієнт місцевого опору в кінці [2].

Втрати тиску на вході в труби гріючої секції:

$$\Delta p_{\text{ex.тр}} = \zeta_{\text{ex}} \cdot \frac{\rho' \cdot \omega_0'^2}{2} = 0,5 \cdot \frac{927,8 \cdot 3^2}{2} = 232 \text{ Па}. \quad (5.18)$$

Втрати при русі води на прямій ділянці:

$$\Delta p_{\text{тр}} = \lambda_1 \cdot h_{\text{но}} \cdot \frac{\rho' \cdot \omega_0'^2}{2} = 0,8 \cdot 0,08 \cdot \frac{927,8 \cdot 1^2}{2} = 29,7 \text{ Па}, \quad (5.19)$$

де $h_{\text{но}} = 0,08$ м – висота нижньої ділянки труби, яка не обігривається.

Щоб розрахувати на економайзерній ділянці втрати спочатку потрібно визначити її висоту $h_{\text{ек}}$. Ця величина обчислюється за допомогою наступного рівняння:

$$h_{\text{ек}} = \frac{g \cdot \rho' \cdot (h_{\text{новн}} - h_{\text{но}}) \cdot (\partial i' / \partial p) - (\Delta p_{\text{он}} + \Delta p_{\text{но}} + \Delta p_{\text{ек}}) \cdot (\partial i' / \partial p)}{\frac{4 \cdot q_{\text{вн}}}{\rho' \cdot \omega_0' \cdot d_{\text{вн}}} + g \cdot \rho' \cdot (\partial i' / \partial p)} \quad (5.20)$$

$$\text{де } \Delta p_{\text{он}} = \Delta p_{\text{з.тр}} + \Delta p_{\text{ex.с}} = 218,7 + 6243 = 6462 \text{ Па}; \quad (5.21)$$

$$\Delta p_{\text{но}} = \Delta p_{\text{ex.тр}} + \Delta p_{\text{тр}} = 232 + 29,7 = 26,64 \text{ Па};$$

$$q_{\text{вн}} = k \cdot \Delta t_{\text{с}} = 2,4 \cdot 13,1 = 31,44 \cdot 10^3 \text{ Вт/м}^2; \quad (5.22)$$

$(\partial i' / \partial p) = 7,8 \cdot 10^{-4}$ – зміна ентальпії води за температури насичення залежно від різниці тисків $p \rightarrow p_3$, де p_3 — тиск у перерізі, в якому відбувається кипіння рідини.

У розрахунках зазвичай не враховують втрачання тиску на ділянці економайзера. Проте, за потреби, вплив перепаду тиску $\Delta p_{ек}$ можна врахувати, задавши початкове значення $h_{ек}$, застосовуючи метод послідовних наближень, досягти його узгодження з величиною, отриманою за відповідною формулою. У подальших розрахунках приймемо $h_{ек} = 0,87$ м, тоді:

$$\Delta p_{ек} = \lambda_1 \cdot h_{ек} \cdot \frac{\rho' \omega_0^2}{2} = 0,8 \cdot 0,87 \cdot \frac{927,8 \cdot 1^2}{2} = 322,87 \text{ Па.} \quad (5.23)$$

Отже,

$$h_{ек} = \frac{9,81 \cdot 927,8 \cdot (1,6 - 0,08) \cdot 7,8 \cdot 10^{-4} - (6462 + 26,64 + 322,87) \cdot 7,8 \cdot 10^{-4}}{\frac{4 \cdot 31,44}{927,8 \cdot 1 \cdot 0,012} + 9,81 \cdot 927,8 \cdot 7,8 \cdot 10^{-4}} = 0,885 \text{ м.} \quad (5.24)$$

Прийняте та обчислене значення $h_{ек}$ майже збігаються. Тому висоту економайзерної ділянки можна вважати рівною 0,885 м, а втрати на цій ділянці — такими:

$$\Delta p_{ек} = 322,87 \cdot \frac{0,885}{0,87} = 328,6 \text{ Па.} \quad (5.25)$$

Отже, сумарний опір у підвідних лініях (до перерізу, де починається закипання потоку) становить:

$$\Delta p_{підв} = \Delta p_{оп} + \Delta p_{но} + \Delta p_{ек} = 6462 + 322,87 + 328,6 = 7052 \text{ Па.} \quad (5.26)$$

Розрахуємо корисний напір при тій самій швидкості $\omega_0 = 1$ м/с. Об'єм пари, яка утворюється в одній трубі, дорівнює:

$$G_1'' = \frac{Q}{z \cdot r_2} = \frac{560,71}{320 \cdot 2204,4} = 7,95 \cdot 10^{-4} \text{ кг/с,} \quad (5.27)$$

де $r_2 = 2204,4$ кДж/кг —теплота пароутворення при температурі насичення [2].

Нормована швидкість пари на виході із труб нагрівальної секції:

$$\omega_{ок}'' = \frac{G_1''}{\rho'' \cdot 0,785 \cdot d_{ен}^2} = \frac{7,95 \cdot 10^{-4}}{1,863 \cdot 0,785 \cdot 0,012^2} = 3,77 \text{ м/с,} \quad (5.28)$$

де $\rho'' = 1,863$ кг/м³ — густина із вторинної пари [2].

Рушійний напір обчислюється виходячи зі середньої нормованої швидкості пари всередині труби. Так як на самому початку труби пари відсутні, то

$$\omega_{0\text{розр}}'' = \frac{\omega_{ок}''}{2} = \frac{3,77}{2} = 1,9 \text{ м/с.} \quad (5.29)$$

За цього значення $\omega_{0\text{розр}}''$ витратний паровміст:

$$\beta_{розр} = \frac{\omega_{0\text{розр}}''}{\omega_{0\text{розр}}'' + \omega_0} = \frac{1,9}{1,9 + 1} = 0,65. \quad (5.30)$$

Реальний об'ємний вміст пари розраховується за формулою:

$$\varphi_{розр} = \frac{\beta_{розр}}{1 + \frac{\omega^*}{\omega_{сум.розр}}} = \frac{0,65}{1 + \frac{6,24}{2,9}} = 0,21, \quad (5.31)$$

де $\omega^* = \omega_{бул} \cdot \psi_{вз} = 1,3 \cdot 4,8 = 6,24 \text{ м/с}$ – сумарна швидкість виходу бульбашок;

$\omega_{сум.розр} = \omega_{0\text{розр}}'' + \omega_0 = 1,9 + 1 = 2,9 \text{ м/с}$ – швидкість суміші;

$\omega_{бул}$ - швидкість руху окремої бульбашки у нерухомій рідині:

$$\omega_{бул} = 1,5 \cdot \sqrt[4]{g \cdot \sigma_i \cdot \frac{\rho' - \rho''}{(\rho')^2}} = 1,5 \cdot \sqrt[4]{9,81 \cdot 52,65 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{927,8 - 1,863}{927,8^2}} = 1,3 \text{ м/с,} \quad (5.32)$$

де $\sigma_i = \sigma_0 - 0,146 \cdot t = 72,8 - 0,146 \cdot 138 = 52,65 \cdot 10^{-3} \text{ Н/м}$ – поверхневий натяг води [2];

$\psi_{вз}$ - фактор взаємодії:

$$\psi_{вз} = 1,4 \cdot \left(\frac{\rho'}{\rho''}\right)^{1,5} \cdot \left(1 - \frac{\rho''}{\rho'}\right)^5 = 1,4 \cdot \left(\frac{927,8}{1,863}\right)^{1,5} \cdot \left(1 - \frac{1,863}{927,8}\right)^5 = 4,8. \quad (5.33)$$

Рушійний напір:

$$\Delta p_{руш} = g \cdot (\rho' - \rho'') \cdot \varphi_{розр} \cdot h_{нар} = 9,81 \cdot (927,8 - 1,863) \cdot 0,21 \cdot 0,635 = 1195 \text{ Па,} \quad (5.34)$$

де $h_{нар}$ – висота труби, по якій тече пароводяна суміш:

$$h_{нар} = H - h_{но} - h_{ек} = 1,6 - 0,08 - 0,885 = 0,635 \text{ м.} \quad (5.35)$$

У пароводяній лінії спостерігаються втрати через тертя всередині труби, місцеві втрати при виході, а також втрати, пов'язані з прискоренням потоку. Втрати, спричинені тертям, обчислюються за наступною формулою:

$$\Delta p_{\text{мер}} = \lambda_1 \cdot h_{\text{нар}} \cdot \frac{\rho' \cdot \omega_0^2}{2} \cdot \left[1 + \psi \cdot \frac{\omega''_{\text{ок}}}{2\omega_0} \cdot \left(1 - \frac{\rho''}{\rho'} \right) \right] = 0,8 \cdot 0,635 \cdot \frac{927,8 \cdot 1^2}{2} \cdot \left[1 + 1,5 \cdot \frac{3,77}{2 \cdot 1} \cdot \left(1 - \frac{1,863}{927,8} \right) \right] = 900,84 \text{ Па.} \quad (5.36)$$

Втрати, що виникають при виході потоку з труб.

$$\Delta p_{\text{вих}} = \xi_{\text{вих}} \cdot \frac{\rho' \cdot \omega_0^2}{2} \cdot \left[1 + \frac{\omega''_{\text{ок}}}{\omega_0} \cdot \left(1 - \frac{\rho''}{\rho'} \right) \right] = 1,2 \cdot \frac{927,8 \cdot 1^2}{2} \cdot \left[1 + \frac{3,77}{1} \cdot \left(1 - \frac{1,863}{927,8} \right) \right] = 2654 \text{ Па.} \quad (6.37)$$

Втрати, пов'язані з прискоренням потоку, обчислюються за формулою:

$$\Delta p_{\text{пр}} = (\rho' \cdot \omega_0)^2 \cdot (y_2 - y_1) = (927,8 \cdot 1)^2 \cdot (1,73 \cdot 10^{-3} - 1,078 \cdot 10^{-3}) = 563,7 \text{ Па,} \quad (5.38)$$

$$\text{де } y = \frac{x^2}{\rho'' \cdot \varphi_{\kappa}} + \frac{(1-x)^2}{\rho' \cdot (1-\varphi_{\kappa})}. \quad (5.39)$$

Для перерізу, у якому рідина закипає, $x = 0$ і $\varphi_{\kappa} = 0$. Отже,

$$y_1 = \frac{1}{\rho'} = \frac{1}{927,8} = 1,078 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{кг.} \quad (5.40)$$

У вихідному перерізі

$$\omega_{\text{сум.к}} = \omega''_{\text{ок}} + \omega_0 = 3,77 + 1 = 4,77 \text{ м/с;} \quad (5.41)$$

$$\beta_{\kappa} = \frac{\omega''_{\text{ок}}}{\omega''_{\text{ок}} + \omega_0} = \frac{3,77}{4,77 + 1} = 0,82; \quad (5.42)$$

$$\varphi_{\kappa} = \frac{\beta_{\kappa}}{1 + \frac{\omega^*}{\omega_{\text{сум.к}}}} = \frac{0,82}{1 + \frac{6,24}{4,77}} = 0,355. \quad (5.43)$$

Масова частка пару в цьому перерізі становить:

$$x_{\kappa} = \frac{\rho'' \cdot \omega''_{\text{ок}}}{\rho' \cdot \omega_0} = \frac{1,863 \cdot 4,77}{927,8 \cdot 1} = 7,6 \cdot 10^{-3}, \quad (5.44)$$

$$\text{і тоді } y_2 = \frac{x_{\kappa}^2}{\rho'' \cdot \varphi_{\kappa}} + \frac{(1-x_{\kappa})^2}{\rho' \cdot (1-\varphi_{\kappa})} = \frac{(7,6 \cdot 10^{-3})^2}{1,863 \cdot 0,355} + \frac{(1-7,6 \cdot 10^{-3})^2}{927,8 \cdot (1-0,355)} = 1,73 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{кг.} \quad (5.45)$$

Корисний напір: $\Delta p_{кор} = \Delta p_{руш} - \Delta p_{мер} - \Delta p_{вих} - \Delta p_{пр} = 1195 - 900,84 - 2654 - 563,7 = -2923$ Па.

(5.46)

Аналогічні обчислення виконаємо для кількох різних значень ω_0 . Результати розрахунків зведемо в таблицю 5.1.

Таблиця 5.1 – Залежність опору в підвідних лініях й корисного напору від різних значень ω_0

$\omega_0 = 0,3$	$\Delta p_{нідв} = 613,55$	$\Delta p_{кор} = 1352$
$\omega_0 = 0,4$	$\Delta p_{нідв} = 1095$	$\Delta p_{кор} = 753,32$
$\omega_0 = 0,6$	$\Delta p_{нідв} = 2486$	$\Delta p_{кор} = -464$
$\omega_0 = 0,8$	$\Delta p_{нідв} = 4463$	$\Delta p_{кор} = -1700$
$\omega_0 = 1$	$\Delta p_{нідв} = 7052$	$\Delta p_{кор} = -2923$

Побудувавши графіки залежності корисного напору та гідравлічних втрат у підвідних трубопроводах від значення ω_0 (рис. 5.2), у точці їх перетину визначаємо необхідну швидкість циркуляції: $\omega_0 = 0,383$ м/с.

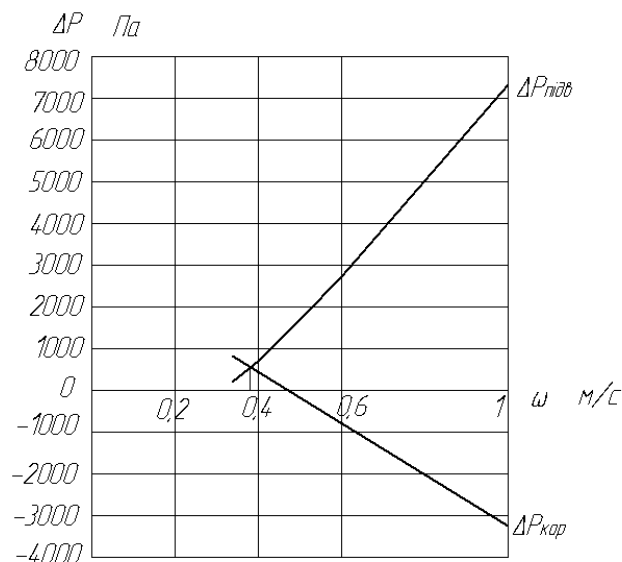


Рис. 5.2. Графічне відображення залежності корисного напору та втрат від швидкості циркуляції.

Обчислимо швидкість циркуляції за допомогою формули:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{2 \cdot g \cdot \varphi_{розр} \cdot h_{нар}}{Z_{нід.пр} + \frac{\sum \Delta p_{руч.п}}{(\rho' \cdot \omega_0^2) / 2}} \cdot \left(1 - \frac{\rho''}{\rho'}\right)}. \quad (5.47)$$

Прийmemo значення $\omega_0 = 1$ м/с. Для цього значення загальний зведений коефіцієнт гідравлічного опору підвідної ділянки системи (включно з опускною ділянкою, не підігрітою зоною та економайзерним відрізком) визначається за

$$\text{формулою: } Z_{нід.пр} = Z_{он} \cdot \left(\frac{\omega_0''}{\omega_0}\right)^2 + Z_{но} + Z_{ек} = 1,553 \cdot \left(\frac{3}{1}\right)^2 + 0,564 + 0,708 = 15,25,$$

(5.48)

де $Z_{он} = \xi_{ex} + \lambda_0 \cdot H + \xi_a = 0,5 + 0,033 \cdot 1,6 + 1 = 1,553$ – повний коефіцієнт гідравлічного опору опускної ділянки;

(5.49)

$Z_{но} = \xi_{ex} + \lambda_1 \cdot h_{но} = 0,5 + 0,8 \cdot 0,08 = 0,564$ – повний коефіцієнт гідравлічного опору ділянки, яка не підігрівається;

(5.50)

$Z_{ек} = \lambda_1 \cdot h_{ек} = 0,8 \cdot 0,885 = 0,708$ – повний коефіцієнт гідравлічного опору економайзерної ділянки.

(5.51)

Таким чином,

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{2 \cdot 9,81 \cdot 0,21 \cdot 0,635}{15,25 + \frac{900,84 + 2654 + 563,7}{(927,8 \cdot 1^2) / 2}} \cdot \left(1 - \frac{1,863}{927,8}\right)} = 0,33 \text{ м/с}. \quad (5.52)$$

Отримане значення позитивно узгоджується з раніше прийнятим, тому повторне обчислення не є доцільним. Розрахована за цією методикою швидкість циркуляції $\omega_0 = 0,381$ м/с практично схоже зі значенням, визначеного нормативним методом ($\omega_0 = 0,383$ м/с). Відхилення між ними суттєво менше допустимої похибки для такого типу розрахунків. З огляду на те, що третій десятковий знак не є визначальним і має недостатню точність, остаточно приймаємо значення швидкості рівним $\omega_0 = 0,38$ м/с.

6.1.3. Обчислення коефіцієнта тепловіддачі між теплообмінною поверхнею та киплячою водою.

Визначимо значення комплексу:

$$\frac{q_{\text{вн}}}{r_2 \cdot \rho'' \cdot \omega_0} \cdot \left(\frac{\rho''}{\rho'}\right)^{1.45} \cdot \left(\frac{r_2}{c'_p \cdot T}\right)^{0.33} = \frac{31,44}{2204,4 \cdot 1,863 \cdot 0,38} \cdot \left(\frac{1,863}{927,8}\right)^{1.45} \cdot \left(\frac{2204,4}{4,27 \cdot 411,15}\right)^{0.33} = 2,65 \cdot 10^{-6} \quad (5.54)$$

Оскільки $\frac{q_{\text{вн}}}{r_2 \cdot \rho'' \cdot \omega_0} \cdot \left(\frac{\rho''}{\rho'}\right)^{1.45} \cdot \left(\frac{r_2}{c'_p \cdot T}\right)^{0.33} = 2,65 \cdot 10^{-6} < 0,4 \cdot 10^{-5}$, то $\frac{Nu_{\kappa}}{Nu} = 1$ і коефіцієнт

тепловіддачі визначається за формулою:

$$Nu = 0,023 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,37} = 0,023 \cdot 21380^{0,8} \cdot 1,24^{0,37} = 72,5, \quad (5.55)$$

$$\text{де } Re = \frac{\omega_0 \cdot d_{\text{вн}}}{\nu} = \frac{0,38 \cdot 0,012}{0,215 \cdot 10^{-6}} = 21380 \text{ - критерій Рейнольда;} \quad (5.56)$$

$Pr = 1,24$ - критерій Прандтля.

$$\text{Звідси: } \alpha_2 = \frac{Nu \cdot \lambda}{d_{\text{вн}}} = \frac{72,5 \cdot 68,52 \cdot 10^{-2}}{0,012} = 4139 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{°C)}. \quad (5.57)$$

Приймаємо опір оксидної плівки $R_{\text{ок}} = 0,6 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт}$.

$$\alpha'_2 = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_2} + R_{\text{ок}}} = \frac{1}{\frac{1}{4139} + 0,6 \cdot 10^{-4}} = 3316 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{°C)}. \quad (5.58)$$

6.1.4. Визначення коефіцієнта теплопередачі

Коефіцієнт тепловіддачі, розрахований відносно внутрішньої поверхні труб, визначається за наступною формулою:

$$k_{\text{вн}} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{d_{\text{вн}}}{2 \cdot \lambda_{\text{ст}}} \cdot \ln \frac{d_{\text{зовн}}}{d_{\text{вн}}} + \frac{1}{\alpha'_2} \cdot \frac{d_{\text{вн}}}{d_{\text{зовн}}}} =$$

$$= \frac{1}{\frac{1}{7230} + \frac{0,012}{2 \cdot 47} \cdot \ln \frac{0,014}{0,012} + \frac{1}{3316} \cdot \frac{0,012}{0,014}} = 2400 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{°C)}. \quad (5.59)$$

Значення коефіцієнта теплопередачі, визначене за наведеною методикою, збігається з раніше прийнятим у початкових розрахунках. Таким чином, теплові та гідродинамічні розрахунки є завершеними.

Конструктивний розрахунок

Конструкторські розрахунки здійснюємо згідно з методикою, викладеною в джерелі [3].

Виконуємо розрахунок випарника на основі таких вихідних даних:

площа поверхні теплообміну $A_{т.вн.} = 6,67 \text{ м}^2$;

тиск вторинної пари $p_{вт} = 0,33 \text{ МПа}$;

діаметр трубок $d = 14 \times 1 \text{ мм}$;

продуктивність $D_{вн} = 300 \text{ кг/год}$;

довжина трубок $1,1 \text{ м}$;

діаметр циркуляційної труби $D_{т.вн.} = 0,124 \text{ м}$;

густина вторинної пари $\rho'' = 1,863 \text{ кг/м}^3$;

густина води очищеної $\rho_g = 965 \text{ кг/м}^3$;

коефіцієнт кінематичної в'язкості вторинної пари $\nu_n = 5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$.

Приймаємо: відносний крок трубок $\beta = 1,35$; діаметр краплі $d_k = 0,2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$.

Тоді крок між трубками $t = \beta \cdot d_{зовн} = 1,35 \cdot 0,014 = 0,019 \text{ м}$. (5.60)

Обчислимо кількість трубок за такою формулою:

$$n = \frac{A_{т.вн.}}{\pi \cdot d_{вн} \cdot H_m} = \frac{6,67}{3,14 \cdot 0,012 \cdot 0,66} = 268 \text{ трубок}. \quad (5.61)$$

Оскільки за результатами теплового розрахунку виявилось, що потрібно більше трубок у гріючій секції, подальші обчислення проводимо для кількості $n = 270$ трубок. Розміщення трубок виконуємо за схемою з вершинами правильних трикутників, тобто при куті $\alpha = 60^\circ$, де $\sin \alpha = \sin 60^\circ = 0,866$. Діаметр корпусу апарата обчислюється за формулою:

$$D_{\text{корп}} = \sqrt{\frac{1,27 \cdot n \cdot t^2 \cdot \sin \alpha}{\phi} + (D_{\text{м.вн.}} + 2 \cdot t)^2} =$$

$$= \sqrt{\frac{1,27 \cdot 270 \cdot 0,019^2 \cdot 0,866}{0,85} + (0,124 + 2 \cdot 0,019)^2} = 0,382 \text{ м.} \quad (5.62)$$

Приймаємо діаметр корпусу апарата $D_{\text{корп}} = 400$ мм (за зовнішнім діаметром, оскільки оболонка виготовляється з труби).

Обчислимо об'єм пари за годину:

$$V_n = \frac{D_{\text{вип}}}{\rho''} = \frac{300}{1,863} = 171 \text{ м}^3/\text{год.} \quad (5.63)$$

Визначаємо швидкість пари в паровій зоні:

$$\omega_{n,n} = \frac{V_n}{3600 \cdot 0,785 \cdot D_{\text{корп}}^2} = \frac{171}{3600 \cdot 0,785 \cdot 0,382^2} = 0,7 \text{ м/с.} \quad (5.64)$$

Визначимо значення числа Рейнольдса для пари:

$$\text{Re}_n = \frac{\omega_{n,n} \cdot d_k}{\nu_n} = \frac{0,7 \cdot 0,0002}{4,5 \cdot 10^{-6}} = 31. \quad (5.65)$$

Оскільки $\text{Re}_n < 500$, швидкість осідання краплі розраховується за формулою:

$$\omega_{\text{вип}} = \sqrt{\frac{4 \cdot g \cdot (\rho_g - \rho'') \cdot d_k}{3 \cdot \xi \cdot \rho''}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 9,81 \cdot (965 - 1,863) \cdot 0,0002}{3 \cdot 2,36 \cdot 1,863}} = 0,76 \text{ м/с,} \quad (5.66)$$

$$\text{де } \xi = \frac{18,5}{\text{Re}_n^{0,6}} = \frac{18,5}{31^{0,6}} = 2,36 \text{ – коефіцієнт опору.} \quad (5.67)$$

Отже, швидкість руху пари в паровому просторі є меншою за швидкість винесення крапель, що свідчить про дотримання умови для запобігання захопленню рідини паром.

Далі розрахуємо мінімально допустиму висоту парового простору. Загальна площа перетину кип'ятильних трубок становить:

$$f_{mp} = 0,785 \cdot d_{en}^2 \cdot n = 0,785 \cdot 0,012^2 \cdot 320 = 0,036 \text{ м}^2. \quad (5.68)$$

Швидкість пари на виході з кип'ятильних трубок:

$$\omega_n = \frac{V_n}{3600 \cdot f_{mp}} = \frac{171}{3600 \cdot 0,036} = 3,46 \text{ м/с}. \quad (5.69)$$

За номограмою [3], при тиску $p_{em} = 0,42$ МПа, швидкості пари $C_n = \omega_n = 3,46$ м/с та діаметрі корпуса $D_{корп} = 472$ мм, визначаємо допустиме навантаження на одиницю об'єму парового простору, яке становить 1,4 т/(м·год). Для апарата з навантаженням 0,84 т/год необхідна висота парового простору буде:

$$H_1 = \frac{V_{вин}}{1,4} = \frac{0,84}{1,4} = 0,6 \text{ м}. \quad (5.70)$$

Об'єм парового простору: $V_{n.n} = 0,785 \cdot D_{корп}^2 \cdot H_1 = 0,785 \cdot 0,472^2 \cdot 0,6 = 0,107 \text{ м}^3. \quad (5.71)$

Об'ємне напруження парового простору: $d' = \frac{V_n}{V_{n.n}} = \frac{451}{0,107} = 4225 \text{ м}^3 / (\text{м}^3 \cdot \text{год}), \quad (5.72)$

що знаходиться в допустимих межах.

6.3 Розрахунок штуцерів

Діаметр штуцерів і трубопроводів визначається з рівняння витрат

$$V = \frac{\pi d^2}{4} w, \text{ з іншого боку } V = \frac{G}{3600 \cdot \rho}, \quad (5.73)$$

де V – секундний об'єм пари або рідини, м³/с;

w – швидкість пари або рідини, м/с;

d – діаметр трубопровода, м;

ρ – густина пари або рідини, кг/м^3 .

G – годинна витрата пари або рідини, кг/год ;

З цих двох залежностей загальна формула для обчислення діаметрів штуцерів буде такою: $d = 0,0188 \sqrt{\frac{G}{w \cdot \rho}} = 0,0188 \sqrt{\frac{G \cdot v}{w}}$, (5.74)

де v – питомий об'єм рідини або пари.

1. Штуцер гріючої пари: витрата гріючої пари в годину – $G_{sp} = 980$ кг/год .

Приймаємо швидкість пари рівною 20 м/с. Тоді:

$$d_1 = 0,0188 \sqrt{\frac{980 \cdot 0,3825}{20}} = 0,081 \text{ м}, \quad (5.75)$$

де $v_{sp} = 0,3825$ кг/м^3 – питомий об'єм гріючої пари.

Обираємо штуцер з номінальним діаметром $d_{y1} = 100$ мм.

Штуцер для вторинної пари: задаємо швидкість руху вторинної пари на рівні 25 м/с. Кількість вторинної пари, тобто об'єм води, що випаровується в колоні:

$$G_g = D_{\text{вип}} \frac{b_0 - b_1}{b_0} = 300 \cdot \frac{100 - 10}{100} = 270 \text{ кг/год}, \quad (5.76)$$

де $b_0 = 100$ мл^{-1} – початковий вміст мікроорганізмів у очищеній воді;

$b_1 = 100$ мл^{-1} – остаточний вміст мікроорганізмів у воді для ін'єкцій;

$$\text{Тоді: } d_2 = 0,0188 \sqrt{\frac{270 \cdot 0,4718}{25}} = 0,068 \text{ мм}, \quad (5.77)$$

де $v_{sp} = 0,4718$ кг/м^3 – питомий об'єм вторинної пари.

Обираємо штуцер із номінальним діаметром проходу $d_{y2} = 80$ мм.

2. Штуцер для відведення конденсату: задаємо швидкість руху рідини 1,5 м/с;

густина конденсату за температури $t = 100^\circ \text{C}$ становить $\rho_k = 958$ кг/м^3 .

$$\text{Отже, } d_3 = 0,0188 \sqrt{\frac{G}{\rho_k \cdot w}} = 0,0188 \sqrt{\frac{270}{958 \cdot 1,5}} = 0,0144 \text{ м.} \quad (5.78)$$

Вибираємо трубу з номінальним (умовним) діаметром $d_{y3} = 25$ мм.

4. Штуцер для подачі розчину на випарювання: масова витрата розчину становить $S = 1800$ кг/год, при температурі $t = 90^\circ \text{C}$ його густина дорівнює $\rho_g = 965$ кг/м³. Таким чином:

$$d_4 = 0,0188 \sqrt{\frac{S}{\rho_g \cdot w}} = 0,0188 \sqrt{\frac{1800}{965 \cdot 1}} = 0,034 \text{ м.} \quad (5.79)$$

Візьмемо діаметр умовного проходу, рівний $d_{y4} = 40$ мм.

5. Штуцер для відведення розчину після завершення роботи апарата (випареної води в першій колоні — 270 кг/год): кількість розчину, що виходить з апарата, становить $G_k = S - G_g = 1800 - 270 = 1530$ кг/год. Тоді

$$d_5 = 0,0188 \sqrt{\frac{G_k}{\rho_g \cdot w}} = 0,0188 \sqrt{\frac{1530}{965 \cdot 1}} = 0,03 \text{ м.} \quad (5.80)$$

Візьмемо штуцер із номінальним діаметром проходу $d_{y5} = 32$ мм.

7. Технологічний маршрут виготовлення деталі

№	Назва операції, переходу	Технологічне обладнання, інструмент оброблюваний, контрольний
10	Заготівельна	Вилити заготовку у пісок
20	Токарна (УЗЗ)	Верстат 16К20, 3-х кулачковий патрон
20.1	Торцювати пов. (1) Ø120мм	Прохідний різець відігнутий правий В×Н×L=16×25×140мм, α=8°, γ=10°, φ=45°
20.2	Розточити пов.(2) Ø80 мм начорно L=25мм	Різець розточний В×Н×L=16×25×140мм штангенциркуль ШЦ1
20.3	Розточити пов.(3) Ø80 мм начисто L=25мм	Різець розточний В×Н×L=16×25×140мм штангенциркуль ШЦ1
20.4	Розточити пов.(4) Ø46 мм на L=18 мм	Різець розточний В×Н×L=16×25×140мм штангенциркуль ШЦ1
20.5	Розточити пов.(5) Ø70 мм на L=3 мм	Різець розточний В×Н×L=16×25×140мм штангенциркуль ШЦ1
20.6	Розточити канавку	Різець карнавочний В×Н×L=16×25×140мм, α=8°, γ=10°, φ=90° штангенциркуль ШЦ1
20.8	Зняти фаску 2×45°	Різець розточний відігнутий правий В×Н×L=16×25×140мм, α=8°, γ=10°, φ=45°
30	Токарна (УЗЗ)	Верстат 16К20, 3-х кулачковий патрон
30.1	Торцювати пов.	Прохідний різець відігнутий правий В×Н×L=16×25×140мм, α=8°, γ=10°, φ=45°
30.2	Розточити канавку	Фасонний різець, Т15К6 штангенциркуль ШЦ1
40	Фрезерна Установити, закріпити, зняти	Фрезерний верстат 6П10
40,1	Фрезерувати поверхню витримавши розмір	Торцева фреза D = 30 мм, z = 8, P18, Штангенциркуль ШЦ1
50	Свердлильна (УЗЗ)	Свердлильний верстат 2Б53, кондуктор
50.1	Свердлити 4 отвори Ø8мм l=20 мм.	Свердло ø8P6M5 штангенциркуль
50.2	Свердлити 3 отвори Ø10мм	Свердло ø10, P6M5 штангенциркуль

Вибір способу отримання заготовки

Матеріалом для виготовлення деталі слугує сталь марки **12X18H10**. Правильний підбір заготовки є ключовим етапом у технологічному процесі, оскільки від цього залежить ефективність використання матеріалу, кількість виробничих операцій та складність технологічних переходів.

У машинобудуванні основними видами заготовок є:

- литво з чавуну, сталі або кольорових сплавів;
- поковки та вироби об'ємного штампування зі сталі або кольорових металів;
- прокат сортовий і профільний зі сталі та сплавів на кольорових металах тощо.

Для виготовлення заданої деталі обрано метод лиття в піщані форми. У виробництві харчового обладнання, особливо при невеликих обсягах випуску, найчастіше застосовується литво в земляні форми, сформовані відкритим способом або в опоках. Заготовки з підвищеною точністю отримують за допомогою кокільного литва, оболонкового формування, за виплавлюваними моделями, литтям під тиском та іншими методами.

Розрахунок припусків.

Припуск на тонке точіння: $2Z_{3\min} = 2 \cdot \left(R_{z3} + D_3 + \sqrt{T_{np2}^2 + \varepsilon_{y3}^2} \right)$,

де:

- $R_{z2} = 25$ мкм — висота мікронерівностей;
- $D_2 = 25$ мкм — глибина пошкодженого шару (табл. 11);
- $T_{np2} = 100$ мкм — просторові похибки при попередньому обробленні;
- $\varepsilon_{y3} = 100$ мкм — похибка закріплення деталі в патроні.

Підставляючи значення, отримуємо: $2Z_{3\min} = 2 \cdot \left(25 + 25 + \sqrt{100^2 + 100^2} \right) = 383 \text{ мкм}$.

Найбільше допустиме значення припуску на обробку: $2Z_{3\max} = 2Z_{3\min} + T_2 - T_3$,
де:

- $T_2 = 120$ мкм — допуск за попереднім етапом оброблення;
- $T_3 = 30$ мкм — допуск на поточному етапі.

Розрахунок: $2Z_{3\max} = 383 + 120 + 30 = 533$ мкм.

Номінальне значення припуску: $2Z_{3ном} = \frac{2Z_{3\max} + 2Z_{3\min}}{2} = \frac{533 + 383}{2} = 458$ мкм.

Припуск на чистове точіння: $2Z_{2\min} = 2 \cdot \left(R_{z1} + D_1 + \sqrt{T_{np1}^2 + \varepsilon_{y2}^2} \right)$,

де:

- R_{z1} — висота мікронерівностей,
- D_1 — глибина зони з дефектами після попередньої обробки,
- T_{np1} — сумарна похибка, яка виникає при чорновому точінні (береться з табл. 11),
- ε_{y2} — похибка базування при встановленні заготовки у патроні.

Задані значення:

- $R_{z1} = 100$ мкм,
- $D_1 = 100$ мкм,
- $T_{np1} = 100$ мкм,
- $\varepsilon_{y2} = 100$ мкм.

Підставимо значення у формулу: $2Z_{2\min} = 2 \cdot \left(100 + 100 + \sqrt{100^2 + 100^2} \right) = 682.8$ мкм.

Визначення максимального припуску при обробленні:

$$2Z_{2\max} = 2Z_{2\min} + T_1 - T_2,$$

де:

- $T_1 = 740$ мкм — допустиме відхилення на попередньому етапі обробки,
- $T_2 = 120$ мкм — припустиме відхилення на поточному етапі.

Номинальне значення припуску на механічну обробку поверхні:

$$2Z_{2ном} = \frac{2Z_{2max} + 2Z_{2min}}{2} = \frac{1542.8 + 682.8}{2} = 1112.8 \text{ мкм.}$$

Припуск на чорнове точіння: $2Z_{1min} = 2 \cdot \left(R_{z0} + D_0 + \sqrt{T_{np0}^2 + \varepsilon_{y1}^2} \right)$,

де:

- ε_{y1} — похибка при закріпленні заготовки в процесі чорнового оброблення;
- R_0, T_{np0}, D_0 , — відповідно висота мікронерівностей, сумарна величина просторових відхилень вилівка та глибина дефектного шару.

Для даного випадку приймаємо:

- $T_{np0} = 0.2$ мм,
- $R_{z0} + D_0 = 600$ мкм (згідно табл. 11),
- $\varepsilon_{y1} = 100$ мкм (для встановлення в патроні).

Загальний припуск: $2Z_{сум} = \sum_i^1 2Z_{iном} = 453 + 1112.8 + 1647 = 3213 \text{ мкм.}$

Розрахунок мінімального припуску: $2Z_{1min} = 2 \cdot \left(600 + \sqrt{200^2 + 100^2} \right) = 1647 \text{ мкм.}$

Отже, приймаємо: $2Z_{сум} = 3$ мм.

Перехід 20.1 Торцювання поверхні діаметром Ø120 мм.

Задаємо глибину різання — 2 мм. Згідно з табл. №17, подача становить $S = 0,6 \dots 1,2$ мм/об; відповідно до технічних характеристик верстата обираємо $S = 1$ мм/об. Швидкість різання визначаємо за даними таблиці №20.

$$V = \frac{C_V}{T^{0,2} \cdot t^{0,15} \cdot S^{0,35}} = \frac{328}{80^{0,2} \cdot 2^{0,15} \cdot 1^{0,35}} = 123,06 \text{ м/хв}$$

Необхідна швидкість обертання шпинделя верстата:

$$n_B = \frac{1000 \cdot V}{\pi \cdot d_3} = \frac{1000 \cdot 123}{3,14 \cdot 120} = 138 \text{ об/хв}$$

Обираємо менше з найближчих значень частоти обертання шпинделя верстата — $n_B = 125$ об/хв. При цьому фактичне значення швидкості різання становить:

$$V_D = \frac{\pi \cdot d \cdot n_B}{1000} = \frac{3,14 \cdot 120 \cdot 125}{1000} = 111,47 \text{ м/хв}$$

Орієнтовна довжина зони обробки для даного переходу:

$$L = l_{DET} + l_1 + l_2 + l_3 = 25 + 2 + 2 = 29 \text{ мм}$$

l_{DET} - загальна довжина деталі

l_1 - величина підведення інструменту $l_1 = 2$ мм

l_2 - глибина врізання інструменту

l_3 - додатковий хід інструмента після обробки

Тривалість основної операції для даного переходу:

$$t_0 = \frac{L}{n_B \cdot S} = \frac{29}{125 \cdot 1} = 0,23 \text{ хв}$$

Час на допоміжні операції для здійснення переходу:

$$t_D = t_1 + t_2 = 0,1 + 0,12 = 0,22 \text{ хв}$$

$t_1 = 0,1$ хв — час, необхідний на допоміжні операції, пов'язані з конкретним переходом при поперечному точінні із встановленням різця на упорі на токарному

верстаті з висотою центрів не більше 200 мм при використанні автоматичної подачі (див. табл. 26). $t_2 = 0,06 + 0,06 = 0,12$ — витрати часу на зміну швидкості обертання шпинделя.

Перехід 20.2 обточування поверхні $\varnothing 120 \times l = 25$ мм.

Призначаємо глибину різку 2 мм.

Відповідно до табл. №17, рекомендована подача становить 0,6–0,9 мм/об. З урахуванням технічних характеристик верстата обираємо $S = 0,7$ мм/об.

Швидкість різання визначаємо згідно з табл. №20.

$$V = \frac{C_V}{T^{0,2} \cdot t^{0,15} \cdot S^{0,35}} = \frac{262}{70^{0,2} \cdot 2^{0,15} \cdot 0,7^{0,35}} = 114,4 \text{ м/хв}$$

Потрібна кількість обертів шпинделя станка: $n_B = \frac{1000 \cdot V}{\pi \cdot d_s} = \frac{1000 \cdot 114,4}{3,14 \cdot 120} = 405$ об/хв

Обираємо найближче менше значення частоти обертання шпинделя — $n_B = 400$ об/хв. При такій частоті обертів фактична швидкість різання становить:

$$V_D = \frac{\pi \cdot d \cdot n_B}{1000} = \frac{3,14 \cdot 120 \cdot 400}{1000} = 113 \text{ м/хв}$$

Обчислена довжина оброблюваної ділянки для даного переходу:

$$L = l_{ДЕТ} + l_1 + l_2 + l_3 = 25 + 2 + 2 = 29 \text{ мм}$$

l_1 - величина підведення інструмента $l_1 = 2$ мм

l_2 - глибина врізання інструменту

l_3 - додатковий хід інструмента після обробки

$l_{ДЕТ}$ - загальна довжина деталі

Час, необхідний для виконання переходу:

$$t_D = t_1 + t_2 = 0,1 + 0,12 = 0,22 \text{ хв}$$

$t_1 = 0,1$ хв — час на допоміжні дії, безпосередньо пов'язані з переходом при поперечному точінні із встановленням різця по упору на станку з висотою центрів не більше 200 мм при використанні автоматичної подачі (див. табл. 26).

$t_2 = 0,06 + 0,06 = 0,12$ хв – допоміжний час, необхідний для зміни частоти обертання шпинделя та подачі.

Перехід 20.3 Чорнове розточування $\varnothing 80 \times l = 25$ мм.

Глибина різання встановлюємо на рівні 2 мм.

Згідно з табл. №17, подача знаходиться в діапазоні $S = 0,6 \dots 0,9$ мм/об., після перевірки паспортних даних верстата обираємо подачу $S = 0,7$ мм/об.

Швидкість різання визначаємо за табл. №20.

$$V = \frac{C_V}{T^{0,2} \cdot t^{0,15} \cdot S^{0,35}} = \frac{262}{70^{0,2} \cdot 2^{0,15} \cdot 0,7^{0,35}} = 114,4 \text{ м/хв}$$

Потрібна частота обертів шпинделя станка:

$$n_B = \frac{1000 \cdot V}{\pi \cdot d_s} = \frac{1000 \cdot 114,4}{3,14 \cdot 80} = 467 \text{ об/хв}$$

Приймаємо менше з можливих значень частоти обертання шпинделя верстата — $n_B = 400$ об/хв. За цієї частоти обертання фактична швидкість різання дорівнює:

$$V_D = \frac{\pi \cdot d \cdot n_B}{1000} = \frac{3,14 \cdot 80 \cdot 400}{1000} = 100,48 \text{ м/хв}$$

Орієнтовна довжина обробки для даного переходу:

$$L = l_{ДЕТ} + l_1 + l_2 + l_3 = 25 + 2 + 2 = 29 \text{ мм}$$

l_1 - величина підведення інструмента $l_1 = 2$ мм

l_2 - глибина врізання інструменту

l_3 - додатковий хід інструмента після обробки

$l_{ДЕТ}$ - загальна довжина деталі

Час основної обробки для даного переходу:

$$t_0 = \frac{L}{n_B \cdot S} = \frac{29}{400 \cdot 0,7} = 0,1 \text{ хв}$$

Час на допоміжні операції під час переходу:

$$t_D = t_1 + t_2 = 0,1 + 0,12 = 0,22 \text{ хв}$$

$t_1 = 0,1$ хв – час на допоміжні дії, безпосередньо пов'язані з переходом при поперечному точінні із встановленням різця по упору на станку з висотою центрів не більше 200 мм при використанні автоматичної подачі (див. табл. 26).

$t_2 = 0,06 + 0,06 = 0,12$ хв – допоміжний час, необхідний для зміни частоти обертання шпинделя та подачі.

Перехід 20.4 розточування отвору розміром $\varnothing 80 \times l = 25$ мм.

Глибина різання встановлюється на рівні 0,5 мм. Згідно з табл. №18, подача становить $S = 0,14 \dots 0,17$ мм/об.; після звірки з технічними характеристиками верстата обираємо $S = 0,15$ мм/об. Швидкість різання визначається за табл. №20.

$$V = \frac{C_V}{T^{0,2} \cdot t^{0,15} \cdot S^{0,35}} = \frac{262}{70^{0,2} \cdot 0,5^{0,15} \cdot 0,15^{0,35}} = 421 \text{ м/хв}$$

Необхідна швидкість обертання шпинделя верстата:

$$n_B = \frac{1000 \cdot V}{\pi \cdot d_3} = \frac{1000 \cdot 421}{3,14 \cdot 80} = 1465 \text{ об/хв}$$

Приймаємо менше з можливих значень частоти обертання шпинделя верстата — $n_B = 1250$ об/хв. За цієї частоти обертання фактична швидкість різання дорівнює:

$$V_D = \frac{\pi \cdot d \cdot n_B}{1000} = \frac{3,14 \cdot 80 \cdot 1250}{1000} = 314 \text{ м/хв}$$

Визначена довжина обробки для даного переходу:

$$L = l_{ДЕТ} + l_1 + l_2 + l_3 = 25 + 2 + 2 = 29 \text{ мм}$$

l_1 - величина підведення інструмента $l_1 = 2$ мм

l_2 - глибина врізання інструменту

l_3 - додатковий хід інструмента після обробки

$l_{ДЕТ}$ - загальна довжина деталі

Час основної обробки для переходу:

$$t_0 = \frac{L}{n_B \cdot S} = \frac{29}{1250 \cdot 0,15} = 0,15 \text{ хв}$$

Час, витрачений на допоміжні операції під час переходу:

$$t_d = t_1 + t_2 = 0,15 + 0,12 = 0,27 \text{ хв}$$

$t_1 = 0,1$ хв – час на допоміжні дії, безпосередньо пов'язані з переходом при поперечному точінні із встановленням різця по упору на станку з висотою центрів не більше 200 мм при використанні автоматичної подачі (див. табл. 26).

$t_2 = 0,06 + 0,06 = 0,12$ хв – допоміжний час, необхідний для зміни частоти обертання шпинделя та подачі.

Перехід 20.9 Зняти фаску $1 \times 45^\circ$.

Приймаємо глибину різання 2 мм.

Подача за табл. №17 коливається в межах $S=0,4 \dots 0,5$ мм/об.; після перевірки паспортних даних верстата обираємо $S=0,5$ мм/об. Швидкість різання визначається згідно з табл. №20.

$$V = \frac{C_V}{T^{0,2} \cdot t^{0,15} \cdot S^{0,35}} = \frac{241}{70^{0,2} \cdot 2^{0,15} \cdot 0,5^{0,35}} = 116,9 \text{ м/хв}$$

Потрібна швидкість обертання шпинделя станкового зразку:

$$n_B = \frac{1000 \cdot V}{\pi \cdot d_s} = \frac{1000 \cdot 116,9}{3,14 \cdot 80} = 465,7 \text{ об/хв}$$

Встановлюємо $n_B=400$ об/хв. Реальна швидкість різання при такій частоті обертів

$$\text{дорівнює: } V_d = \frac{\pi \cdot d \cdot n_B}{1000} = \frac{3,14 \cdot 80 \cdot 400}{1000} = 100,48 \text{ м/хв}$$

Визначена довжина обробки для даного переходу:

$$L = l_{ДЕТ} + l_1 + l_2 + l_3 = 2 + 2 + 1 = 5 \text{ мм}$$

l_1 - величина підведення інструмента $l_1 = 2$ мм

l_2 - глибина врізання інструменту

l_3 - додатковий хід інструмента після обробки

$l_{ДЕТ}$ - загальна довжина деталі

Час основної обробки для переходу:

$$t_0 = \frac{L}{n_B \cdot S} = \frac{5}{400 \cdot 0,5} = 0,025 \text{ хв}$$

Час, витрачений на допоміжні операції в процесі переходу:

$$t_D = t_1 + t_2 = 0,025 + 0,12 = 0,145 \text{ хв.}$$

Перехід 30.1 Торцювати поверхню $\varnothing 165 \text{ мм}$

Глибина різання приймається рівною 2 мм. Згідно з табл. №17 подача коливається в межах $S=0,6 \dots 1,2 \text{ мм/об.}$; після перевірки паспортних даних верстата обираємо $S=1 \text{ мм/об.}$ Розраховуємо швидкість різання за табл. №20.

$$V = \frac{C_V}{T^{0,2} \cdot t^{0,15} \cdot S^{0,35}} = \frac{328}{80^{0,2} \cdot 2^{0,15} \cdot 1^{0,35}} = 123,06 \text{ м/хв}$$

Потрібна швидкість обертання шпинделя станкового зразку:

$$n_B = \frac{1000 \cdot V}{\pi \cdot d_s} = \frac{1000 \cdot 123}{3,14 \cdot 165} = 237 \text{ об/хв}$$

Приймаємо менше з можливих значень частоти обертання шпинделя верстата — $n_B=200 \text{ об/хв.}$ За цієї частоти обертання фактична швидкість різання дорівнює:

$$V_D = \frac{\pi \cdot d \cdot n_B}{1000} = \frac{3,14 \cdot 165 \cdot 200}{1000} = 103,6 \text{ м/хв}$$

Визначена довжина оброблення для даного переходу:

$$L = l_{ДЕТ} + l_1 + l_2 + l_3 = 60 + 2 + 2 = 64 \text{ мм}$$

l_1 - величина підведення інструмента $l_1 = 2 \text{ мм}$

l_2 - глибина врізання інструменту

l_3 - додатковий хід інструмента після обробки

$l_{ДЕТ}$ - загальна довжина деталі

Основний час виконання переходу:

$$t_0 = \frac{L}{n_B \cdot S} = \frac{64}{200 \cdot 1} = 0,32 \text{ хв}$$

Час, витрачений на допоміжні операції в процесі переходу:

$$t_D = t_1 + t_2 = 0,32 + 0,12 = 0,44 \text{ хв}$$

$t_1 = 0,1$ хв – час на допоміжні дії, безпосередньо пов'язані з переходом при поперечному точінні із встановленням різця по упору на станку з висотою центрів не більше 200 мм при використанні автоматичної подачі (див. табл. 26).

$t_2 = 0,06 + 0,06 = 0,12$ хв – допоміжний час, необхідний для зміни частоти обертання шпинделя та подачі.

Перехід 50.1. Свердлити отвір $\varnothing 8$.

Під час виконання свердління глибина різання дорівнює половині діаметра свердла, а саме:

$$t = d_{\text{св}}/2 = 8/2 = 4 \text{ мм.}$$

Згідно з табл. 2, рекомендоване значення подачі знаходиться в межах $0,26 \div 0,32$ мм/об(табл.2). Обираємо подачу $S=0,3$ мм/об

Для обчислення швидкості різання використовуємо формулу з табл. 45:

$$V = 8 \cdot d_{\text{св}}^{0,4} / T^{0,2} \cdot S^{0,7}, \text{ де } T = 30 \text{ хв – ресурс свердла.}$$

Тоді:

$$V = 8 \cdot 8^{0,4} / 30^{0,2} \cdot 0,3^{0,7} = 31,2 \text{ м/хв}$$

Потрібне число обертів шпинделя для свердління:

$$n = 1000 \cdot v / \pi \cdot d_{\text{св}} = 1000 \cdot 31,2 / 3,14 \cdot 8 = 497 \text{ об/хв.}$$

Візьмемо $n_v = 500$ об/хв. У такому разі фактична швидкість:

$$V_d = \pi \cdot d_{\text{св}} \cdot n_v / 1000 = 3,14 \cdot 8 \cdot 500 / 1000 = 31,4 \text{ м/хв.}$$

Час основної обробки визначатиметься за формулою:

$$t_0 = L / n \cdot S = 57 / 500 \cdot 0,3 = 0,41 \text{ хв}$$

$$\text{де } L = l + l_1 + l_2 + l_3 = 22 \text{ мм,}$$

де $l = 12$ мм – глибина отвору, що просвердлюється;

$l_1 = 2$ мм – довжина підведення свердла при ручній подачі;

$l_2 + l_3 = 8$ мм – додатковий запас на врізання та проходження свердла.

Тривалість допоміжних робіт у процесі виконання **циклу** $t_{\text{доп}} = 0,08$ хв.

Перехід 50.2. Виконати свердління отвору діаметром $\varnothing 10$ мм.

Під час свердління величина глибини різання дорівнює половині діаметра свердла, а саме:

$$t = d_{\text{св}}/2 = 10/2 = 5 \text{ мм.}$$

Згідно з табл. 2, рекомендоване значення подачі знаходиться в межах $0,26 \div 0,32$ мм/об(табл.2). Обираємо подачу $S=0,3$ мм/об

Для визначення швидкості різання використовуємо формулу з табл. 45:

$$V = 8 \cdot d_{\text{св}}^{0,4} / T^{0,2} \cdot S^{0,7}, \text{ де } T = 30 \text{ хв} \text{ – ресурс свердла.}$$

Тоді:

$$V = 8 \cdot 10^{0,4} / 30^{0,2} \cdot 0,3^{0,7} = 23,6 \text{ м/хв}$$

Потрібне число обертів шпинделя для свердління:

$$n = 1000 \cdot v / \pi \cdot d_{\text{св}} = 1000 \cdot 23,6 / 3,14 \cdot 10 = 751,6 \text{ об/хв.}$$

Візьмемо $n_{\text{в}} = 750$ об/хв. У такому разі фактична швидкість:

$$V_{\text{д}} = \pi \cdot d_{\text{св}} \cdot n_{\text{в}} / 1000 = 3,14 \cdot 10 \cdot 750 / 1000 = 23,55 \text{ м/хв.}$$

Час основної обробки визначатиметься за формулою:

$$t_0 = L / n \cdot S = 28 / 750 \cdot 0,3 = 0,12 \text{ хв}$$

$$\text{де } L = l + l_1 + l_2 + l_3 = 28 \text{ мм,}$$

де $l = 12$ мм – глибина отвору, що просвердлюється;

$l_1 = 2$ мм – довжина підведення свердла при ручній подачі;

$l_2 + l_3 = 8$ мм - додатковий запас на врізання та проходження свердла.

Час на допоміжні операції при виконанні переходу $t_{\text{доп}} = 0,08$ хв.

Перехід 40.1 Фрезерувати лиски

Розрахунок геометричних параметрів для фрезерування залежно від типу верстата та фрези: глибина різання $t = 25$ мм. Отримуємо геометричні характеристики інструменту (з довідника):

Торцева фреза з діаметром $D_{\text{Ф}} = 30$ мм.

Розмір подачі на зуб $S_z=0,03\dots0,04$ мм/зуб; обираємо $S_z= 0,04$ мм/зуб.

Розраховуємо подачу на один обертальний рух фрези:

$$S_{\text{об. фр}} = S_z \cdot z$$

$$S_{\text{об. фр}} = 0,04 \cdot 2 = 0,08 \text{ мм}$$

Обираємо емпіричну формулу для визначення максимальної швидкості різання сталі (див. табл. 28):

$$V = \frac{13,6 D_\phi^{0,3}}{T^{0,26} t^{0,3} S_z^{0,25}} \quad V_p = \frac{13,6 \cdot 30^{0,3}}{60^{0,25} \cdot 4^{0,3} \cdot 0,04^{0,25}} = 13,452 \text{ м/хв}$$

де $T = 60$ хв. – ресурс фрези (табл. 35);

Орієнтовна частота обертання шпинделя:

$$n_p = \frac{1000 V_p}{\pi D_\phi} = \frac{1000 \cdot 13,452}{\pi \cdot 8} = 535,52 \text{ об/хв}$$

Відкоригувати n_p відповідно до паспортних даних верстата 6М81Г і прийняти

$n_B=400$ об/хв.

У такому разі фактична швидкість обертання:

$$V_d = \frac{\pi D_\phi n_B}{1000} = \frac{\pi \cdot 8 \cdot 400}{1000} = 10,048 \text{ м/хв}$$

Розраховуємо подачу за хвилину:

$$S_{\text{хв}} = S_{\text{об. фр}} \cdot n_B$$

$$S_{\text{хв}} = 0,08 \cdot 400 = 32 \text{ мм/хв}$$

Згідно з нормативними параметрами верстата 6М81Г приймаємо подачу $S_{\text{хв}} = 35$ мм/хв. Обчислюємо орієнтовну довжину оброблення:

$$L_p = L_d + L_1 + L_2;$$

$$L_p = 38 + 2 + 4 = 44 \text{ мм}$$

де $L_1 = 2\dots3$ мм – довжина підведення інструменту,

$L_2=4$ – вріз та перебіг, які визначаються конструкцією фрези.

Час основної обробки для переходу 40.1

$$T_o = L_p / S_{xв}$$

$$T_o = \frac{44}{35} = 1,26 \text{ хв}$$

Час на допоміжні операції:

$$T_d = t_y + t_d$$

$$t_y = t_{y1} + t_{y2},$$

$t_{y1}=0,41$ хв (табл.37) час на встановлення деталі масою не більше 3 кг, шляхом затягування гайки ключем $t_{y2}=0,10$ хв (табл. 37) тривалість прибирання стружки з зони встановлення деталі

$$t_y = 0,41 + 0,10 = 0,51 \text{ хв.}$$

Допоміжний час, що стосується переходу, для верстатів із довжиною стола 1250 мм та автоматичним переміщенням, встановлених по розміру, становить $t_d=0,09$ хв (табл. 38). Тоді

$$T_d = 0,51 + 0,09 = 0,6 \text{ хв}$$

Час основної операції:

$$T_{оп} = T_o + T_d$$

$$T_{оп} = 1,26 + 0,6 = 1,86 \text{ хв}$$

Штучний час:

$$T_{шт} = T_{оп} + T_{об} + T_{пер},$$

$T_{об}=0,045T_{оп}$ та $T_{пер}=0,06T_{оп}$ – відповідно, додатковий час на догляд за робочим місцем і відновлення сил і природні потреби, які враховуються як відсотки від часу основної операції (табл. 36)

$$T_{шт} = 1,86 + 0,045 \cdot 1,86 + 0,06 \cdot 1,86 = 2,04 \text{ хв}$$

Розрахунковий час:

$$T_k = T_{шт} + \frac{T_{п.з.}}{n}$$

$T_{пз}$ – **Підготовчо-завершувальний час**, відповідно до табл. 36, розраховується як сукупність часу, витраченого на налагодження обладнання (при встановленні в лещата з двома кріпильними болтами — 14,7 хв) і часу, необхідного для одержання технічного завдання, інструменту та оснащення — 7 хв.

$$T_{пз}=14,7+7=21,7\text{хв}$$

Тоді

$$\dot{O}_e = 1.84 + \frac{21.7}{200} = 1.95 \text{ хв.}$$

Виробнича норма (кількість виробів за годину):

$$N = \frac{60}{T_e}$$

За формулою визначаємо

$$N = \frac{60}{1.95} = 30.78$$

Опис пристрою.

Пристрій для виконання технологічної операції включає в себе корпус та жорстку оправку, що фіксована у корпусі шляхом запресовування, швидкознімної шайби з гайкою та кондукторної втулки. Деталь встановлюється на жорстку оправку за посадкою H7/h6, що виключає можливість перекосу деталі в пристрої. Торець деталі, який використовується як вимірювальна база, впирається в корпус, що забезпечує співпадіння вимірювальної та технологічної баз. З протилежного боку деталь закріплюється гайкою, між якою і деталлю розміщена швидкознімна шайба. Діаметр гайки є меншим за діаметр оправки, що полегшує швидке зняття і встановлення деталі. У кришці кондуктора виконано отвір, в який встановлена кондукторна втулка, закріплена гвинтом. Ця втулка слугує направляючим елементом для свердла.

Визначення похибки базування

Оцінюємо похибку базування при монтажі деталі на жорстку оправку (палець). Допустиме значення похибки базування дорівнює $\varepsilon_b = 0,2$ мм. Вісь деталі виступає вимірною базою для зовнішньої поверхні, а технологічною базою є оправка (палець). Деталь монтується на оправку за посадкою з зазором H7/d8 і фіксується по торцю. Якщо у з'єднанні максимальний зазор становить $S_{\max} = 2e$, де e — ексцентриситет, тоді похибка базування обчислюється за формулою:

$$\varepsilon_{бд1} = \varepsilon_{бд2} = S_{\max} = S_{\min} + T_H + T_h, \text{ де}$$

$T_H = 0,021$ мм – граничне відхилення на діаметр отвору,

$S_{\min} = 0,065$ мм – найменший зазор у з'єднанні,

$T_h = 0,033$ мм – граничне відхилення діаметра оправки.

Отже, $\varepsilon_{бд1} = \varepsilon_{бд2} = 0,065 + 0,021 + 0,033 = 0,119$ мм

Таким чином, $\varepsilon_{бд1} = \varepsilon_{бд2} = 0,119$ мм $< \varepsilon_b = 0,2$ мм

8. Монтаж, ремонт та експлуатація сушильної установки

8.1 Монтаж установки

При монтажі колон використовують метод крупноблочного монтажу. Ще до підйому апарата його випробовують, покривають тепловою ізоляцією, обв'язують технологічним трубопроводом, оснащують площадками. Це збільшує вагу колони та об'єм монтажу, але заходи окупаються, так як не потрібно будувати додаткових конструкцій, підвищується якість, безпечність робіт та продуктивність.

На монтаж установка поступає в розібраному вигляді. Перед монтажем установку розпаковують, розконсервують (звільняють від мастила та антикорозійного покриття), промивають, перевіряють наявність всіх елементів установки згідно специфікації та пакувальної відомості, змащують вузли тертя, встановлюють прокладки на з'єднаннях трубопроводів і передають на монтаж.

Монтаж здійснюється таким чином: спочатку на підлозі за допомогою анкерних болтів встановлюють станину, до якої потім кріплять колону, потім встановлюють електрошафу та вузол контролю провідності. Вивірку колони здійснюють в вертикальній площині так, щоб зазор між колоною і візком був не більшим 3-5 мм. Точність встановлення станини вивіряється за допомогою рівнемірів і регулюється за допомогою металевих підкладок. Після вивірки регулюючі болти фіксують контргайками і закріплюють станину фундаментними болтами.

Установка колони може виконуватися за допомогою стаціонарних підйомних механізмів або підходящих пересувних підйомних засобів при постійному забезпеченні надійного положення колони в процесі установки.

Після встановлення основних вузлів установки виконують монтаж технологічних комунікацій, трубопроводів, елементів заземлення і автоматизації.

Після того, як всі елементи установки та трубопроводи змонтовані, виконують випробовування установки. Для цього виділяють відповідних осіб з числа представників компанії-виробника та замовника і проводять випробування

протягом 1-3 год. Технологічні випробування проводяться для перевірки герметичності апарату, з'єднання робочих органів і трубопроводів. Під час випробування крім герметичності контролюється температура, тиск, перевіряється злагодженість роботи механізмів приводу машини в цілому.

Після цього складають акт випробування відповідно інструкції компанії-виробника. По закінченню випробувань в паспорті вказують виявлені недоліки, які підлягають усуненню. Акт підписують представники заводу-виробника та представники технічного огляду замовника. Після цього складають Акт приймання обладнання в експлуатацію.

8.2 Технологічна експлуатація

Необхідні умови для нормальної експлуатації установки:

- гарантувати готовність всіх необхідних енергоносіїв – технічної пари, живильної води, охолоджувальної технічної води, стисненого повітря;
- головний вимикач в електричній шафі має бути в положенні “ВКЛ”;
- живильна вода повинна пройти відповідний контроль;

8.3 Технічне обслуговування

Міжремонтне технічне обслуговування має за мету профілактику і попередження випадкових виходів з ладу елементів установки, її передчасний знос і забезпечення нормативних умов роботи.

Технічне обслуговування установки передбачає очищення або, за необхідності, заміну фільтрів, перевірку стану датчиків та паропроводів, огляд і перевірку на герметичність повітропроводів в місцях їх з'єднань, перевірку пневматичних, гідравлічних та інших ущільнень. Також перевіряють стан насосу. Проводять огляд систем подачі і розподілу стиснутого повітря, пневмоциліндрів і пневматичних систем керування. Також обов'язково проводять огляд і перевірку заземлень та засобів аварійної зупинки установки.

За результатами оглядів проводять усунення дрібних дефектів і неполадок, замінюють зношені або пошкоджені елементи.

8.4 Ремонт установки

Ремонт – це сукупність заходів по відновленню працездатності обладнання до рівня надійної експлуатації. Ремонт виконують у випадках, коли відновити працездатність простим регулюванням та наладкою неможливо. Ремонт буває планово-попереджувальний (ППР) і по факту виявлення несправності.

На підприємстві застосовують змішаний метод ремонту, при якому ремонтні роботи здійснюються силами і засобами, підпорядкованими як головному механіку, так і цеховим ремонтним персоналом.

Всі види планових ремонтів обладнання здійснюються у чіткій відповідності до завчасно складеного та затвердженого плану. Графіки ППР складаються головними механіками цехів і доводяться до відома начальника РМД.

Річний графік ППР складається відповідно до норм тривалості міжремонтного циклу, міжремонтного і міжоглядового періодів із урахуванням структури міжремонтного циклу.

Для погодження планів-графіків ремонту з планом основного виробництва потрібно по змозі рівномірно розподіляти простої в ремонті за кварталами та місяцями року та забезпечувати рівномірне завантаження ремонтних робітників.

Структура і тривалість ремонтного циклу для установки наведено в таблиці 7.1:

Таблиця 7.1.

Обладнання	№ ремонтного циклу	Річна трудоемкість, н/г	Час роботи між ремонтами, годин			Примітка
			К	П	О	
Установка для отримання води для ін'єкцій Bosch-Pharmatec	1	32		8640	1440	Робота в 3 зміни

Умовне позначення ремонту/трудоемкість											
січень	лютий	березень	квітень	травень	червень	липень	серпень	вересень	жовтень	листопад	грудень
	О/4		О/4		О/4		П/12		О/4		О/4

Можливі несправності, які можуть виникнути в процесі роботи, діляться на три види:

- несправності, пов'язані з енергоносіями (електроенергія, стисле повітря);
- несправності в ході виконання технологічного процесу;
- несправності, пов'язані з комп'ютером і програмним забезпеченням.

Про несправності в ході виконання технологічного процесу оператор може отримати інформацію наступних видів:

- повідомлення на екрані комп'ютера;
- світлова сигналізація.

Отримавши інформацію про несправності, оператор приймає одне з рішень:

- самостійно усуває несправності і продовжує роботу (якщо має пароль доступу в систему);
- повідомляє про несправності безпосереднього керівника і викликає інженера по організації обслуговування і ремонту;
- негайно зупиняє роботу, повідомляє безпосереднього керівника і інженера по організації обслуговування і ремонту.

9. Системи управління

9.1. Обґрунтування доцільності автоматизації дистилятора Bosch-Pharmatec

Фармацевтична промисловість України останніми роками інтенсивно модернізується для відповідності стандартам GMP, які вимагають мінімізації людського втручання в технологічний процес. Це зумовлює активне впровадження сучасних інформаційних технологій та систем управління. Автоматизація — це використання технічних засобів і методів для управління процесами без участі людини. Її впровадження підвищує продуктивність обладнання, зменшує зношення, витрати сировини та енергії, покращує якість продукції, умови праці, а також підвищує надійність і безпеку виробництва.

9.2 Характеристика системи автоматизації дистилятора Bosch-Pharmatec

Вода для ін'єкцій виготовляється методом багатоступінчастої дистиляції у трубчастих випарниках із природною циркуляцією. Для стабільної роботи установки необхідно точно дозувати живильну воду, гріючу пару та охолоджувальну воду. Підігрів живильної води відбувається в теплообміннику за рахунок пари з 5-ї колони, що дозволяє суттєво зекономити енергію. Система автоматизації регулює подачу ресурсів і контролює якість дистиляту за допомогою датчика провідності. Живильна вода через насос і пневмоклапан, керований датчиком рівня, надходить у теплообмінник, де підігрівається перед подачею в першу колону.

Очищена вода у першій колоні підігрівається технічною парою (0,5 МПа), що подається залежно від рівня заповнення і температури. У колоні відбувається пароутворення — утворена чиста пара підігріває наступну колону, де конденсується у воду для ін'єкцій, і процес повторюється до п'ятої колони. Там пара підігріває живильну воду, а залишок охолоджується технічною водою (+8 °С).

Невикористана пара відводиться через фільтр. Вода з W01 проходить контроль провідності: при $\leq 1,0 \mu\text{S}/\text{см}$ потрапляє у резервуар, при $>1,0 \mu\text{S}/\text{см}$ — зливається в каналізацію. Температура вихідної води також контролюється, а потік охолодження регулюється пневмоклапаном.

9.3. Специфікація на засоби контролю та автоматизації

Наведена в таблиці 6.1:

№ п/п	Номер поз. за схемою	Найменування і технічна характеристика виробу	Тип, Марка	Одиниця виміру	Кількість	Прим.
1.	4а, 12а, 13а, 14а, 15а, 19а	Термометр опору Siemens. Діапазон вимірювань – 0 – 100 С. Вихідний сигнал 4-20 мА, похибка вимірювань 0.5%	SITRANS TF	шт.	6	
2.	2а, 3а, 17а	Термоманометр Magnehelic. Діапазон вимірювань – 0 – 8 бар. Вихідний сигнал 4-20 мА, похибка вимірювань 2%	WP80	шт.	3	
3.	5а	Гідростатичний рівнемір Siemens. Діапазон вимірювань – 8,3 – 30000 мбар, живлення 10-30 VDC. Вихідний сигнал 4-20 мА, похибка вимірювань 0,5%	SITRANS P DSIII	шт.	1	
4.	18а	Вимірювач провідності ДС Електрик. Діапазон вимірювань – 0-100 мкСм/см. Вихідний сигнал 4-20 мА.	ISC202	шт.	1	
5.	22а	Позиціонер електропневматичний Siemens.	SIPART PS2	шт.	1	
6.	18б, 19б	Вторинний показуючий реєструючий прилад ООО «Промприбор».	ДИСК-250	шт.	2	

7.	1а, 4б, 5б, 6а, 7а, 8а, 9а, 10а, 11а, 16а, 19в, 20а, 21а, 23а	Електро-пневмо перетворювач Samozzi, похибка перетворення 0,5%, вхідний сигнал 4-20 мА, вихідний – 20-100 кПа, живлення 24 VDC.	ER104-5PX	шт.	14	
8.	1б, 6б, 7б, 8б, 9б, 10б, 11б, 16б, 20б, 23б	Клапан прохідний з МИМ Burkert, Pу=0-16 атм.	2011	шт.	10	
9.	21б	Клапан двопозиційний прохідний з МИМ Burkert, Pу=0-16 атм.	2002	шт.	1	
10.	4в, 5в, 19г	Клапан регулюючий прохідний з МИМ Burkert, Pу=0-16 атм.	2712	шт.	3	
11.	КМ1	Магнітний пускач Siemens 5,5 кВт, 400В, 12 А, живлення 24 VDC.	3RT1024	шт.	1	

10. Заходи з охорони праці

10.1. Небезпечні фактори при експлуатації установки

До основних небезпечних та шкідливих факторів при роботі на установці належать:

- Підвищена температура обладнання та трубопроводів.
- Електронебезпека при пошкодженні ізоляції.
- Підвищений рівень шуму і вібрацій.
- Недостатнє освітлення і вентиляція.

У робочій зоні можливий вплив небезпечних виробничих факторів, що потребують постійного контролю:

- Наявність тепловиділення – необхідна теплоізоляція обладнання.
- Електроустановки повинні мати заземлення та знаки безпеки.
- Джерела шуму мають бути шумоізольовані, персонал повинен користуватись ЗІЗ.
- Для зниження вібрації використовуються амортизатори та антивібраційні засоби захисту.

10.2. Протипожежна безпека

- Легкозаймисті речовини зберігаються у вогнестійких шафах.
- У приміщеннях повинні бути встановлені вогнегасники відповідного типу (ОП, ОУ).
- Усі працівники повинні знати місцезнаходження засобів пожежогасіння та шляхи евакуації.
- Встановити таблички «Куріння заборонено» та «Відкритий вогонь заборонено».

10.3. Електробезпека

- Устаткування повинно бути заземлене, з герметичним виконанням електрощитів.

- При замиканні електроустановки мають автоматично вимикатись.
- Роботи проводити лише з вимкненим живленням.
- Під ногами – діелектричні ковдри або підставки.
- До роботи допускаються особи старше 18 років з відповідним допуском.

10.4. Вентиляція та освітлення

- Усі виробничі приміщення повинні мати припливно-витяжну вентиляцію.
- Освітлення повинно відповідати нормам для IV розряду зорових робіт – не менше 100 лк.
- У разі аварійного вимкнення – аварійне освітлення не менше 2 лк.

10.5. Засоби індивідуального захисту (ЗІЗ)

Працівники повинні бути забезпечені:

- Захисним одягом (бавовна, антистатичний одяг).
- Рукавицями, окулярами, касками.
- Протишумовими навушниками, антивібраційними рукавицями.

10.6. Мікрокліматичні умови

- Температура повітря: 22–25 °С (оптимально).
- Відносна вологість: 40–60%.
- Швидкість повітря: до 0,2 м/с.

Мікроклімат підтримується вентиляцією, опаленням і кондиціонуванням.

Висновки

В данній дипломній роботі була проведена розробка модернізації дистиляційної установки приготування води для ін'єкцій, а саме заміна газорідного сепаратора на більш ефективний, що дозволило мінімізувати винесення пірогенних речовин у дистиллят і, шляхом зміни параметрів грючої пари і подачі живильної води, підвищити продуктивність на 22% - з 1475кг/год до 1800кг/год.

Аналітичний огляд літератури, в якому розглянуто принципи дії та сучасні методи краплевідділення, моделювання процесу дистиляції в умовах модернізованої конструкції та виконані розрахунки підтверджують доцільність обраної конструкції.

Розроблена оригінальна конструкція сепаратора забезпечує інтенсивніший процес відділення краплинно-рідинної фази із парового току порівняно з базовою, що робить кожну випарну колону і установку загалом економічно більш вигідною та конструктивно досконалою.

Список використаної літератури

1. Batt C.A. Encyclopedia of Food Microbiology (Second Edition) / C.A. Batt. – Elsevier, 2017. – 110 p.
2. Brennan J. G.. Food Processing Handbook, 2nd Edition / James G.B., Alistair S.G. – Wiley-VCH Verlag GmbH & Co, 2011. – 826 p.
3. Fellows P. Food processing technology. Principles and Practice. Second Edition / P. Fellows. – CRC Press, 2000. – 591 p.
4. Godbey W.T. An Introduction to Biotechnology. The Science, Technology and Medical Applications. 1st Edition. Academic Press. 2014
5. Lelieveld H. Handbook of Hygiene Control in the Food Industry (Second Edition) / H. Lelieveld, J. Holah, D. Gabrić. – Elsevier, 2016. – 736 p.
6. Yiu H. Hui. Handbook of Food Science, Technology, and Engineering. / H. Hui Yiu. – CRC Press, 2006. – 928 p.
7. Гончаренко Б.М. Автоматизація виробничих процесів харчових технологій: підручник / Б.М. Гончаренко, А.П. Ладанюк. – Київ: НУХТ, 2014. – 530 с.
8. Заплетніков, І. М. Експлуатація і обслуговування технологічного обладнання харчових виробництв [Текст]: навч. посібник / І. М. Заплетніков, В. Г. Мирончук, В. М. Кудрявцев; Нац. ун-т харч. технол., Донец. нац. ун-т екон. і торг. — Київ: Кафедра, 2018. — 344 с.
9. Інноваційне обладнання харчових виробництв [Електронний ресурс] [Текст]: навч. посібник / О. М. Чепелюк, О. М. Гавва, В. Г. Мирончук та ін.; за ред. О. М. Гавви; Нац. ун-т харч. технол. — Київ: НУХТ, 2024. — 584 с.
10. Історичні фрагменти розвитку кафедри машин і апаратів харчових та фармацевтичних виробництв НУХТ [Текст] / В. Таран, О. Гавва, В. Теличкун, О. Губеня, Решетняк В. // Ukrainian food journal. — 2013. — vol. 2, issue 4. — С. 618-624.
11. Малезик І. Ф., Зав'ялов В. Л., Шевченко О.Ю. та ін. (2021). Процеси і апарати харчових виробництв / за ред. І. Ф. Малезика; Київ: НУХТ, 2021. — 419 с.
12. Монтаж і технічний сервіс обладнання [Текст]: підручник / В. Г. Мирончук, М. В. Якимчук, Д. М. Люлька, С. О. Володін; Національний університет харчових технологій. — Київ: НУХТ, 2024. — 267 с.
13. Нормативно-правове регулювання діяльності біотехнологічних і фармацевтичних підприємств [Текст]: підручник / М. В. Стасевич, А. М. Кричківська, Б. П. Громовик та ін.; Нац. ун-т "Львів. політехніка". — Львів: Новий світ-2000, 2018. — 288 с.
14. Обладнання підприємств переробної і харчової промисловості [Текст]: підручник / В. Г. Мирончук, І. С. Гулий, М. М. Пушанко та ін.; за ред. В. Г. Мирончука. — 2-ге вид., перероб. і доп. — Вінниця: Нова книга, 2007. — 648 с.

15. Основи охорони праці [Електронний ресурс] : навчальний посібник для студентів освітнього ступеня «бакалавр» денної та заочної форм навчання / В. С. Гуць, С. Д. Коваленко, О. В. Євтушенко та ін. – К. : НУХТ, 2016. – 97 с.
16. Павлице, В. Т. Основи конструювання та розрахунків деталей машин [Текст] : Підруч. / В. Т. Павлице. — 2-ге вид., перероб. — Львів : Афіша, 2003. — 560 с.
17. Пирог Т. П. Загальна біотехнологія [Текст] : підручник / Т. П. Пирог, О. А. Ігнатова ; МОН України ; Нац. ун-т харч. технол. — Київ : НУХТ, 2009. — 336 с.
18. Процеси і апарати харчових виробництв [Текст] : приклади і задачі : навч. посіб. / І. Ф. Малезик, П. М. Немирович, В. Л. Зав'ялов та ін. ; за ред. І. Ф. Малезика ; Нац. ун-т харч. технол. — К. : НУХТ, 2015. — 386 с.
19. Розрахунки обладнання підприємств переробної і харчової промисловості [Текст] : Навч. посіб. / В. Г. Мирончук, Л. О. Орлов, А. І. Українець та ін. ; Нац. ун-т харч. технол. — Вінниця : Нова книга, 2004. — 288 с.
20. Сидоров, Ю. І. Процеси і апарати хіміко-фармацевтичної промисловості [Текст] : навч. посіб. / Ю. І. Сидоров, В. І. Чуєшов, В. П. Новіков. — Вінниця : Нова книга, 2009. — 816 с.
21. Соколенко, А. І. Інтенсифікація масообмінних процесів в харчових і мікробіологічних технологіях [Текст] : монографія / А. І. Соколенко, О. Ю. Шевченко, В. А. Піддубний. — К. : Люксар, 2008. — 443 с.
22. Сухенко Ю. Г. Надійність і довговічність устаткування харчових і переробних виробництв: підручник / Ю. Г. Сухенко, О. А. Литвиненко, В. Ю. Сухенко. – Київ: НУХТ, 2010. – 547 с
23. Технологічне обладнання фармацевтичної та біотехнологічної промисловості [Текст] : підручник / С. Т. Стасевич, А. О. Милянч, Л. С. Стрельников та ін. ; Нац. ун-т "Львів. політехніка", Нац. фармац. ун-т. — Львів : Новий світ-2000, 2017. — 500 с.
24. Технологічне обладнання харчових виробництв [Текст] : навч. посібник / В. Теличкун, Ю. Теличкун, О. Губеня та ін. — Київ : Сталь, 2023. — 634 с.
25. Технологічні комплекси харчових виробництв [Текст] : навч. посіб. / В. І. Теличкун, О. М. Гавва, Ю. С. Теличкун та ін. ; Нац. ун-т харч. технол. — Київ : Сталь, 2017. — 456 с.
26. Булій Ю. В. Підвищення експлуатаційних характеристик масообмінних колонних апаратів циклічної дії [Електронний ресурс] / Ю. В. Булій, А. М. Куц, П. Л. Шиян // Наукові праці Національного університету харчових технологій. - 2019. - Т. 25, № 5. - С. 48-54. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Npnukht_2019_25_5_6
27. Chemengvirtual (2022). Distillation Column. Режим доступу: <https://chemengvirtual.uwaterloo.ca/distillation-lab/components/distillation-column.html>.