

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/ Б/ ОК29-2-2025
	<i>Випуск 1</i>	<i>Зміни 0</i>	<i>Екземпляр № 1</i>	<i>Арк 67 / 1</i>

## **ЗАТВЕРДЖЕНО**

науково-методичною радою  
Державного університету  
«Житомирська політехніка»  
протокол від 4 вересня 2025 р.  
№ 5

## **МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ**

для проведення лабораторних занять з навчальної дисципліни

### **«ВИРОБНИЧІ ПРОЦЕСИ ТА ОБЛАДНАННЯ ОБ'ЄКТІВ АВТОМАТИЗАЦІЇ»**

для здобувачів вищої освіти освітнього ступеня «бакалавр»  
спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»  
освітня програма «Комп'ютеризоване управління енергетичними системами»  
факультет комп'ютерно-інтегрованих технологій, мехатроніки і  
робототехніки кафедра робототехніки, електроенергетики та автоматизації  
ім. проф. Б.Б. Самотокіна

Рекомендовано на засіданні  
кафедри робототехніки,  
електроенергетики та  
автоматизації  
ім. проф. Б.Б. Самотокіна  
25 серпня 2025 р., протокол № 7

Розробник: старший викладач кафедри робототехніки, електроенергетики та  
автоматизації ім. проф. Б.Б. Самотокіна БОГДАНОВСЬКИЙ Мартін

Житомир  
2025

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/ Б/ ОК29-2-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 67 / 2

## Лабораторна робота № 1

### Тема: Дослідження технологічного процесу виготовлення паперу.

Мета: Ознайомитися з основними етапами і технологічними параметрами процесу виготовлення паперового полотна.

### Теоретичні відомості

#### 1. Виготовлення паперу на папероробній машині

Для виготовлення паперу та картону застосовують два типи папероробних машин: плоско-сіткові та кругло-сіткові. Перші використовуються для виробництва паперу, другі - картону. Основна відмінність машин полягає в тому, що в плоско-сіткових машинах формування паперового полотна здійснюється на горизонтальній сітці, що рухається, а в кругло-сіткових - полотно формується на циліндричній сітці, що обертається.

#### Підготовка сировини

Сировина для виготовлення паперу де вона, в випадку макулатури, вантажиться в гідрозадувальник, розпускається на окремі волокна разом з водою механічним ротором та очищується від різноманітних домішок у вигляді поліетилену, піску, пластику та металу в машинах грубої та тонкої очистки або у випадку деревини, очищується від кори в окорочному барабані та подрібнюється в щепу яка потім сортується і промивається в промивочній машині декілька годин при певній температурі, відбілюється за допомогою кисню, озону і т.д та стає готовою для подальшого акумулювання та використання в папероробній машині. Заготівельний процес зображено на рисунку 1.1.



Рис.1.1 — Заготівля сировини

#### Пристрій папероробної машини.

Папероробна машина складається із сіткової, пресової, сушильної й оздоблювальної частин і привода. Крім того, до неї відносяться машинний

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/ Б/ ОК29-2-2025
	<i>Випуск 1</i>	<i>Зміни 0</i>	<i>Екземпляр № 1</i>	<i>Арк 67 / 3</i>

басейн для акумулювання паперової маси перед подачею на машину, устаткування для рафінування, помолу й очищення маси, насоси для подачі води й маси, вакуумні насоси, пристрої для переробки браку, басейни оборотної води, припливно-витяжна вентиляційна система, регулюючи і контрольно-вимірвальні прилади.

Більше детальний устрій основних частин плоско-сіткової машини і їхнє призначення розглянуто на прикладі сучасної широкоформатної швидкодійної папероробної машини Б-15 для виробництва газетного паперу.

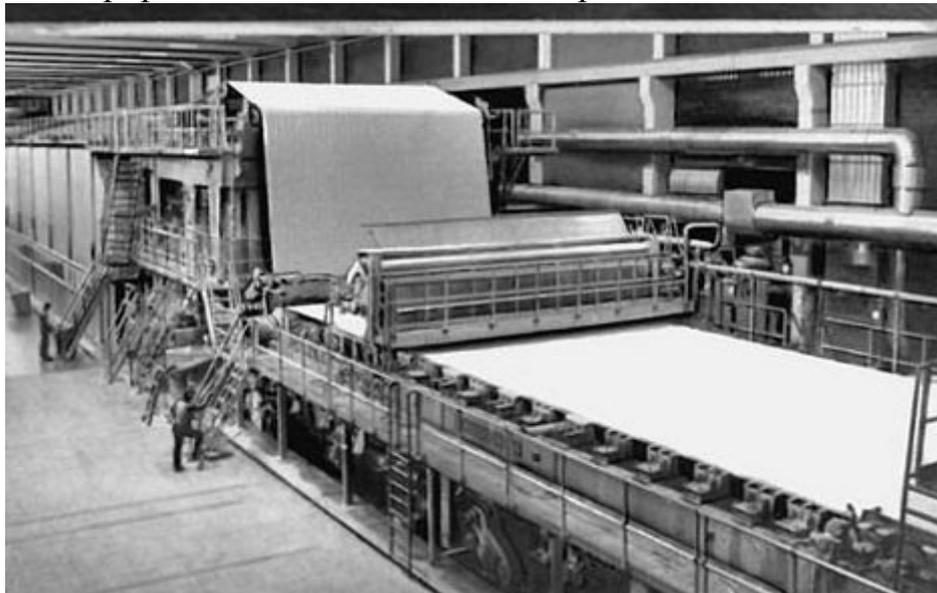


Рис.2.1 - Верстат для виготовлення паперу.

Сіткова частина призначена для формування й зневоднення паперового полотна та включає напірний ящик і сітковий стіл. Напірний ящик призначений для рівномірного та безперервного напуску маси на сітку по всій її ширині. Зараз широко застосовуються закриті напірні ящики, у яких необхідний напір маси створюється тиском повітряної подушки. Паперова маса на сітку виливається за допомогою напускного пристрою, що забезпечує вихід її з однаковою швидкістю та в однаковій кількості по всій ширині сітки, подачу маси спокійним потоком, без перехрещування струменів, завихрень і утворень хлоп'я.

Сітковий стіл являє собою горизонтальну площину, утворену сіткою, натягнутою між грудним валом і гауч-валом, що відсмоктує зайву масу. Зворотна (нижня) частина сітки підтримується сітководучим, сіткоюутимуючим та сітконатяжними валиками. Натяг сітки здійснюється сітконатяжними валиками, а сіткоюутримуючі валики слугують для запобігання сповзання сітки в сторони від поздовжньої осі стола. У рух сітка

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/ Б/ ОК29-2-2025
	<i>Випуск 1</i>	<i>Зміни 0</i>	<i>Екземпляр № 1</i>	<i>Арк 67 / 4</i>

приводиться сіткоповоротним (сітководучим) валом або одночасно сіткоповоротним і гауч-валом.

Сітка є основним елементом сіткового стола. На ній відбувається формування паперового полотна з паперової маси. За допомогою сітки приводяться в рух грудний вал і всі інші валики сіткового стола. При виконанні технологічних функцій сітка піддається інтенсивному механічному й хімічному впливу, тому вона повинна мати достатню міцність на розрив, вигин, стирання й бути кислотостійкою. Вона повинна мати гарну водопропускну здатність і високу щільність, щоб по можливості менше дрібних волокон уходило з оборотною водою та менш помітно було маркування паперу (відбиток сітки на стороні полотна паперу, що стикається із сіткою при формуванні).

Під верхньою віткою сітки, за напрямком її ходу послідовно від грудного до гауч-вала, розташовані: формуюча дошка або ящик, гідропланки або реєстрові валики, ящики, що відсмоктують. Основне призначення цих елементів - формування паперового полотна за рахунок створення режиму зневоднення паперової маси на сітці необхідної інтенсивності, а також утримання сітки від провисання між грудним і гауч-валом.

У сучасних швидкохідних папероробних машинах реєстрові валики поступилися місцем гідропланкам і мокрим ящикам, що відсмоктують. Це забезпечує якісне формування структури полотна паперу при більш інтенсивному процесі його зневоднювання.

Пресова частина слугує для подальшого механічного зневоднення полотна паперу після сіткового стола. У більшості папероробних машин пресова частина складається з 2-3 двовальних пресів. Машини, призначені для виробітку папери з маси жирного помолу, мають 4-5 пресів. Звичайний прес має 2 вали: верхній, гранітний або стонітовий, і нижній, металевий, обліцований гумою. Інтенсивність зневоднення в пресі регулюється тиском між валами, що створюється притисненням, або полегшенням одного з валів (звичайно верхнього). У кожному пресі є сукно, що охоплює один з валів. Сукно встановлюється та підтримується в робочому положенні за допомогою сукноведучих, сукнонатяжних, сукнорозгінних і сукнопровідних валиків. Основне призначення суконь - запобігання руйнуванню структури полотна паперу під час пресування, всмоктування вологи, транспортування слабкого сирого полотна в пресі і його передачі в наступний прес. При проході преса папір однією стороною лежить на сукні та отримує від нього маркування, а іншою - стикається верхнім гладким валом. У результаті чого одна сторона паперу згладжується, а інша ні. Для згладжування цієї поверхні часто встановлюють зворотний прес, у якому сторона паперу, що дотикається в попередньому пресі із сукном, контактує із гладким валом преса. Розвитком

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/ Б/ ОК29-2-2025
	<i>Випуск 1</i>	<i>Зміни 0</i>	<i>Екземпляр № 1</i>	<i>Арк 67 / 5</i>

пресової частини машин для інтенсифікації процесу пресування паперу, замість звичайних пресів є установка відсмоктуючих і здвоєних пресів. Кожний із цих пресів приводиться в рух строго від індивідуального приводу.

Сушильна частина слугує для остаточного зневоднення полотна паперу шляхом випару вологи. Сушильна частина складається із сушильних циліндрів, розташованих у два яруси в шаховому порядку. Сушильний циліндр - це порожній сталевий циліндр діаметром 1500 або 1800 мм, що обігривається пором зсередини. Поверхня циліндрів, як і пресових валів, має високий ступінь обробки - вона відшліфована й відполірована. Циліндри розраховані на робочий тиск 0,35 МПа. Число циліндрів залежить від виду вироблюваного паперу й швидкості машини.

Оздоблювальна частина складається з машинного каландра та накату. Встановлений між сушильною частиною й накатою машинний каландр служить для підвищення лоску, гладкості та об'ємної маси більшості видів паперу. Каландр складається з 5-8 горизонтально один над іншим розташованих валів, що приводяться в рух від нижнього валу. Поверхня валів шліфують і полірують. Лінійний тиск між валами регулюють механізмом притиснення та підйому. У процесі роботи від тертя вали сильно розігріваються, тому для охолодження валів каландра передбачена система їхнього охолодження. Іноді для поверхневої обробки паперу й картону (проклейки, фарбування, просочення та ін.) у процесі її виготовлення на папероробній машині в сушильній частині встановлюють клеїльний прес.

Після машинного каландрування папір надходить на накат, де намотується в рулон. Сьогодні майже на всіх сучасних машинах застосовують периферичні накати барабанного типу. Основною їхньою частиною є чавунний барабан діаметром 1200 мм, що обертається від приводу папероробної машини. Кутова швидкість барабана дорівнює швидкості виготовлення паперового полотна. Намотування рулону паперу здійснюється на тамбурний валик, що спеціальним пристроєм притискається до барабана, забезпечуючи рівномірне й щільне намотування паперу.

Привод папероробної машини призначений для приведення в рух всіх її частин машини. Він забезпечує плавну зміну швидкості окремих частин у певних межах, строго сталість швидкості при сталому режимі роботи машини. Межі зміни регулювання швидкостей залежать від виду вироблюваного паперу.

## **2. Основні технологічні процеси виготовлення паперу на папероробній машині, їхнє призначення й характеристика**

Технологічний процес виготовлення паперу (картону) включає наступні основні операції: акумулювання паперової маси; розведення її

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/ Б/ ОК29-2-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 67 / 6

водою до необхідної концентрації та очищення від сторонніх включень і вузликів; напуск маси на сітку; формування паперового полотна на сітці машини; пресування вологого аркуша та видалення надлишку води: сушіння; машинну обробку й намотування паперу (картону) у рулон. У технологічному потоці виробництва паперу **папероробна** машина - самостійний агрегат, основні вузли якого встановлені строго послідовно вздовж монтажної осі.

### **Акумуляування**

Готування паперової маси проводять у размольно-підготовчому відділі. Потоки волокнистих, наповнюючих, проклеюючих, фарбуючих і інших матеріалів, що становлять композицію даного виду майбутнього паперу, направляються в дозатор або укладач композиції, де вони безупинно й строго дозуються в заданому співвідношенні, а потім надходять у мішальний басейн. У цьому басейні маса ретельно перемішується й акумулюється (накопичується).

### **Рафінування**

Рафінування паперової маси виконується перед її подачею на машину в апаратах безперервної дії - конічних і дискових млинах. У процесі рафінування паперової маси відбувається вирівнювання ступеня помолу маси, усунення пучків волокон. Для цього млини встановлюють після машинного басейну безпосередньо перед папероробною машиною.

### **Подача маси на папероробну машину**

По виходу з машинних басейнів маса при концентрації 2,5- 3,5% дозується й направляється на папероробну машину. Перед надходженням на машину вона розбавляється оборотною водою, очищається від сторонніх забруднень, а також від вузликів і грудочок. Для підтримки постійної продуктивності, виготовлення паперу необхідно, щоб в одиницю часу на сітку машини надходила нормована кількість маси, узгоджена з сталою швидкістю машини. Швидкість машини змінюють при переході на виготовлення іншого виду паперу.

На сучасних папероробних машинах продуктивність у 1 кв.м./с вироблюваного паперу підтримують постійною автоматичними регуляторами. На папероробну машину масу подають за допомогою насоса та ящика постійного напору. Маса, що надходить на папероробній машину, розбавляється водою в змішувальному насосі. Розведення необхідно, по-перше, для наступного очищення маси, тому що з густої маси важко видалити забруднення, і, по-друге, для кращого формування паперу на сітці.

### **Формування паперового аркуша на сітці папероробної машини**

Паперова маса, розведена до необхідної концентрації та очищена від сторонніх включень, надходить у напірний ящик папероробної машини.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/ Б/ ОК29-2-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 67 / 7

Необхідний ступінь розведення маси для відливу паперу на сітці залежить від кількості маси, що подається, роду волокна та ступеню помолу маси.

### **Напуск маси на сітку**

Ця операція здійснюється за допомогою напускного пристрою - напірного ящика. Для нормальної роботи машин при швидкостях 450-500 м/хв потрібен напір маси в напірному ящику 2,5-3 м, при швидкості 600 м/хв - близько 4,2 м и т.д. Напускний пристрій забезпечує напуск паперової маси на сітку, що рухається в напрямку від грудного до гауч-валу, з однаковою швидкістю та в однаковій кількості по всій ширині сітки. Напуск маси здійснюється майже паралельно сітці без сплесків. Швидкість напуску маси на сітку повинна бути на 5-10% нижче швидкості сітки. Якщо швидкість маси значно відстає від швидкості сітки, то збільшується поздовжня орієнтація волокон (орієнтація в машинному напрямку) і міцність паперу в поздовжньому напрямку. Процес напуску продемонстровано на рисунку 1.3.

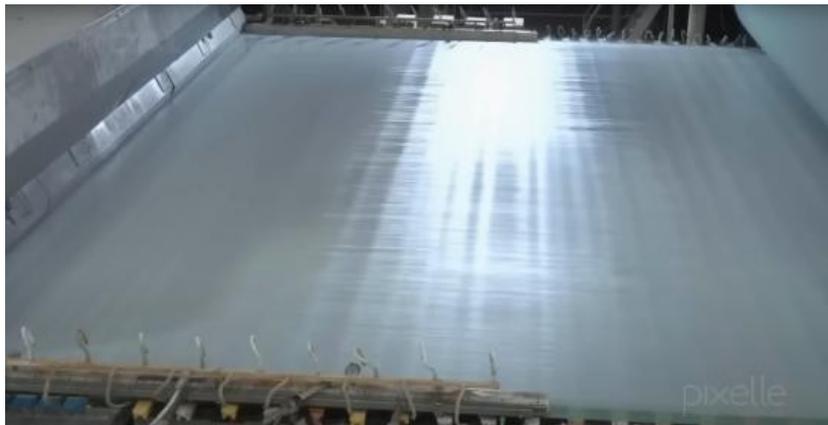


Рис.1.3 — Напуск маси на сітку

### **Формування паперового аркуша (відлив)**

Формування, або відлив, паперового аркуша являє собою процес об'єднання волокон у листову форму зі створенням певної об'ємної капілярно-пористої структури. Цей процес здійснюється на сітковій частині папероробної машини поступовим і послідовним видаленням води з паперової маси (зневодненням). Режим зневоднення, що починає на початку сіткового стола й закінчений сушінням паперу в сушильній частині, на всіх етапах технологічного процесу впливає на якість паперу й продуктивність машини. Ділянка формування паперового аркуша зображена на рисунку 1.4.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/ Б/ ОК29-2-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 67 / 8



Рис.1.4 — Формування паперового аркуша

### Пресування

Після сіткової частини паперове полотно надходить у пресову частину, що складається звичайно з декількох пресів, на яких воно послідовно зневоднюється до сухості 30-42%. Для інтенсифікації зневоднення полотна в пресовій частині застосовують преси з жолобчастими валами та підвищеним лінійним тиском між ними. Важливе значення для зневоднення полотна мають належний підбір суконь і їхнє кондиціонування. Паперове полотно, сформоване в сітковій частині, автоматично вакуум-всмоктуючим пристроєм передається на сукно пресової частини. Сучасні конструкції комбінованих многовальних пресів забезпечують проходження паперу без вільних ділянок (ділянок, де полотно паперу не підтримується сукном), що дозволяє здійснити безперервне проходження паперу в пресовій частині.

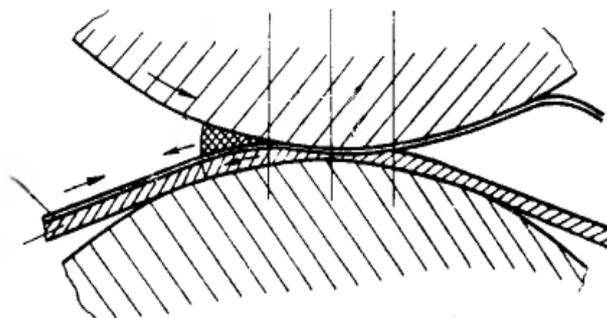


Рис.1.5 — Схема процесу пресування

### Сушіння

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/ Б/ ОК29-2-2025
	<i>Випуск 1</i>	<i>Зміни 0</i>	<i>Екземпляр № 1</i>	<i>Арк 67 / 9</i>

У сушильній частині папероробної машини паперове полотно зневоднюється до кінцевої сухості 92-95%. У процесі сушіння віддаляється 1,5-2,5 кг води на 1 кг паперу, що приблизно в 50-100 разів менше, ніж на сітковій і пресовій частинах машини. При сушінні одночасно відбувається подальше ущільнення й зближення волокон. У результаті підвищується механічна і гладкість паперу. Від режиму сушіння залежать об'ємна маса, здатність до всмоктування, повітропроникність, прозорість, усадка, вологостійкість, ступінь проклеювання та фарбування паперу.

Паперове полотно, проходячи по сушильних циліндрах, по черзі стикається з нижніми й верхніми циліндрами то однією, то іншою поверхнею. Для кращого контакту між циліндрами та папером і полегшення заправлення застосовують сушильні сукна (сітки), що охоплюють сушильні циліндри приблизно на 180°.

Сушіння паперу на сушильному циліндрі складаються із двох фаз: на нагрітій поверхні циліндра під сукном і на ділянці вільного ходу, тобто коли паперове полотно переходить із одного циліндра на іншій. У першій фазі, під сукном, випаровується основна кількість вологи: на тихохідних машинах до 80-85%, на швидкохідних до 60-75% всієї вологи, що випаровує в сушильній частині машини. У другій фазі, на ділянках вільного ходу волога випаровується по обидва боки паперу за рахунок тепла, поглиненого папером у першій фазі сушіння. При цьому папір залежно від швидкості машини отримує зниження температури на 4-15°. При спаді температури знижується швидкість сушіння, особливо на тихохідних машинах, тому що на них спад температури полотна паперу більший, ніж на швидкохідних. З підвищенням швидкості машини кількість води, що випаровується на ділянці вільного ходу паперу збільшується. Зі зменшенням кількості води в паперовому полотні інтенсивність сушіння на вільній ділянці знижується.

Температуру сушильних циліндрів підвищують поступово, що сприяє поліпшенню якості паперу та завершенню процесу проклеювання. Наприкінці сушильної частини температуру поверхні циліндрів знижують, тому що висока температура при невеликій вологості паперу діє на волокна руйнуючи їх.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/ Б/ ОК29-2-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 67 / 10



Рис.1.6 — Сушильна частина папереробної машини

### Обробка.

Після сушіння паперове полотно з метою ущільнення й підвищення гладкості проходить через машинний каландр, що складається з розташованих один над іншим 2-8 валів. Полотно, огортаючи по черзі вали каландра, папір проходить між ними при зростаючому тиску. Сучасні машинні каландри забезпечуються механізмами притиску, підйому й злегшення валів. Нижній вал і один із проміжних виконуються із регульованим прогином, що дозволяє застосовувати високі тиски в захватах валів при збереженні рівномірності тиску по ширині полотна. Пройшовши каландр, паперове полотно безупинно намотується на тамбурні вали в рулон діаметром до 2500 мм. Перезаправлення з одного тамбурного вала на іншій здійснюється за допомогою спеціальних механізмів і пристроїв.



Рис.1.6 — Пристрій каландру та намоту.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/ Б/ ОК29-2-2025
	<i>Випуск 1</i>	<i>Зміни 0</i>	<i>Екземпляр № 1</i>	<i>Арк 67 / 11</i>

Після папероробної машини папір надходить на подовжньо-фрезерний верстат і далі до пакувальної машини. Для одержання більш високих показників щільності, гладкості й лоску більшість видів паперу для друку і писання пропускають через суперкаландр.

Розміщення папероробних машин.

Паперо- і картоноробні машини розміщуються на двох поверхах. Основні вузли машини, де формується, обводнюється й намотується полотно, розміщуються на другому поверсі, а допоміжне устаткування технологічних комунікацій - на першому. На першому поверсі встановлюється також устаткування для переробки мокрого (гауч-мешалка) і сухого (гідророзбивач) браку, станція централізованого змачення та ін.

### **Порядок виконання роботи**

1. Ознайомитись із основними етапами технологічного процесу виготовлення паперу .
2. Привести структурно-параметричний опис основного технологічного процесу (ТП):
  - а) Назва та порядок виконання технологічних операції (ТО) за основним ТП. Зміст операцій. (Представити у вигляді структурної схеми із зазначенням матеріальних потоків, що сполучають технологічні операції)
  - б) Назва та призначення (принцип дії) основного та допоміжного технологічного обладнання, що використовується при реалізації технологічних операції, загальні технічні характеристики обладнання.
  - в) Основні технологічні параметри, що контролюються при проходженні ТП із прив'язкою до обладнання, що їх забезпечують.
3. Зробити висновки по роботі.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/ Б/ ОК29-2-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 67 / 1

## Лабораторна робота № 2

### Тема: Дослідження технологічного процесу виготовлення багат шарових керамічних друкованих плат за технологією LT.

Мета: Ознайомитися з основними етапами і технологічними параметрами процесу виготовлення керамічних друкованих плат.

### Теоретичні відомості

Безперервно зростаючі вимоги до компактності і надійності виробів електронної техніки (ВЕТ) привели до того, що традиційні складальні комутаційні носії компонент (у тому числі і багат шарові друкарські плати - БДП) далеко не повністю забезпечують оптимізацію вузлів і блоків ВЕТ. Використання складальних модулів, виконаних за технологією LTCC, дозволяє у ряді випадків усунути вищезгадані проблеми. Метою даного керівництва є опис технології LTCC виготовлення багат шарових керамічних плат, і приведення основних технологічних вимог необхідних розробникам виробів електронної техніки при створенні свого продукту з використанням модулів на основі даної технології. Аббревіатура LTCC розшифровується як Low Temperature Co Fired Ceramic що в перекладі українською мовою означає «Низкотемпературна (менше 1000 0с) що спікається за одну технологічну операцію кераміка». Основними перевагами даної технології є:

- Компактні розміри і міцність конструкції:
- Можливість інтеграції пасивних компонентів
- Об'ємний дизайн ланцюгів (багат шарові ВЧ / СВЧ модулі і комутаційні тривимірні плати)
  - Безпосередня установка чіп - компонентів на плату
  - Високі технічні характеристики і надійність:
  - Висока добротність і малі втрати
  - Контрольований імпеданс ланцюгів
  - Стабільність до зовнішніх дій
  - Висока повторюваність параметрів
  - Розширений (по відношенню до багат шарових друкарських плат) діапазон робочих температур і механічних навантажень
    - Швидка розробка прототипу
    - Можливість організації масового виробництва з подальшою зміною параметрів.
    - Низька ціна.

Велика кількість, як ВЧ/СВЧ пристроїв, так і деяких інших виробів електронної техніки, в даний час виконується за технологією LTCC. Це

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/ Б/ ОК29-2-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 67 / 2

змішувачі, дільники і суматори потужності, розгалужувачі, подвійники частоти, фільтри, ВЧ трансформатори, модулятори і так далі. Причому, окрім стандартних продуктів також можливе виконання замовлених пристроїв заснованих на дизайні замовника.

## **Технологічний процес виготовлення багатошарових керамічних плат виконаних по LTCC – технології**

### **Будова керамічних плат**

Керамічна друкована плата, стала новим стандартом галузі електричних компонентів. Хоч ця технологія була вперше впроваджена в керамічних конденсаторах, зараз вона використовується в багатьох різних сферах.

Властивості керамічних матеріалів, що використовуються у процесі виробництва керамічних друкованих плат, роблять їх довговічними та надійними. Стаючи чудовою альтернативою іншим електричним компонентам. Вони містять менше токсичних хімічних речовин і мають менший вуглецевий слід, ніж їх традиційні аналоги.

Для виготовлення керамічних друкованих плат використовуються різні керамічні матеріали. При виборі керамічних матеріалів звертають увагу на дві основні характеристики: теплопровідність плати та коефіцієнт теплового розширення.

Три найпоширеніші в використанні матеріали це: Оксид алюмінію ( $Al_2O_3$ ) Нітрид алюмінію (AlN) Оксид берилію ( $BeO$ )

Узагальнений опис процесу виготовлення багатошарових керамічних плат виконаних по LTCC – технології. Для того, щоб добре представляти можливості даної технології розглянемо докладніше процес виготовлення багатошарової керамічної плати. Для цього спочатку приведемо всі стадії технологічного процесу, а потім розглянемо деякі з них детальніше. Типовий технологічний процес виготовлення багатошарової керамічної друкованої плати представлений на рисунку 2.1.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/ Б/ ОК29-2-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 67 / 3

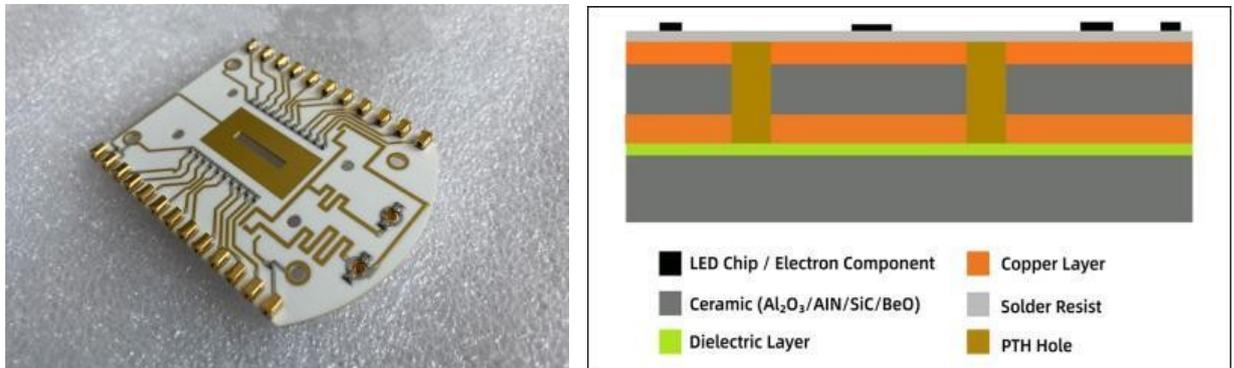


Рис.2.1 — Загальний вигляд та структура керамічної плати

### Технологія LTCC

LTCC – це технологія для виготовлення ефективних та компактних багат шарових керамічних плат. Ця аббревіатура розшифровується як – Низькотемпературна (до 1000 С) Спечена Кераміка. І самій технології вже більше сорока років.

Вона забезпечує недороге пакувальне рішення з коротким циклом розробки та відповідає потребам легких, тонких, коротких і невеликих виробів.

Однак підкладки LTCC мають високу твердість і крихкість що викликає значне тертя, яке передає напругу на ріжуче лезо.

Основними перевагами LTCC є:

- Компактність та міцність - що дає змогу інтегрувати резистори конденсатори та інші пасивні компоненти. Створювати об'ємні ланцюги та встановлювати чип-компоненти безпосередньо на плату.
- Висока повторюваність параметрів, та можливість змінювати параметри при уже організованому масовому виробництві.
- Стабільність параметрів до зовнішніх дій й висока якість сигналів разом з широким діапазоном робочих температур та швидким прототипуванням і низькою собівартістю.

Технологічний процес включає в себе наступні операції:

- Формування «сирої» керамічної стрічки (Tape Casting)
- Обрубання заготовок (Blanking)
- Температурна стабілізація керамічних заготовок (Stabilizing)
- Формування перехідних контактних отворів під поміжшарові контактні з'єднання (Via form)
  - Заповнення перехідних контактних отворів електропровідним матеріалом (Via Fill)
- Трафаретний друк провідних ланцюгів (Circuit print)
- Формування вікон під монтаж компонентів (Cavity form)

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/ Б/ ОК29-2-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 67 / 4

- Збірка шарів в пакет (Collate layers)
- Пресування пакету (Laminate)
- Обрубкування пакету до процесу випалення (Green Cut)
- Спикання і обпалення (Burnout & Fire)
- Нарізка обпаленого пакету на модулі (Dice)
- Додаткова обробка після випалення (Post Fire Processing)
- Тестування і контроль модулів (Final Inspection and Test)

Розглянемо деякі з приведених вище стадій докладніше, попутно привівши для кожної ряд вимог і обмежень що накладаються процесом виготовлення плат. Слід зазначити, що стрічка і плати, розроблені згідно цим пропонованим критеріям відповідатимуть стандартним технологічним можливостям АТС, не обмежуючи, в той же час, рівень складності дизайну конструкторської розробки замовника. Кожен пропонований проект на першому етапі підлягає розгляду з точки зору практичної можливості виготовлення тривалість виробничого циклу і його вартості.

#### **Формування сирової керамічної стрічки:**

Під час цього процесу створюються тонкі листи кераміки. Порошкова кераміка змішується з розчинником, пластифікатором та зв'язуючими речовинами для створення шлікеру (суспензію, що складається з дрібнодисперсного керамічного порошку, органічного зв'язуючого, пластифікатора, розчинника та допоміжних добавок.)

Усі компоненти ретельно змішують і перемелюють у кульовому млині, щоб досягти рівномірного розподілу частинок і необхідної консистенції. Отриману шлірівку дегазують у вакуумі для видалення повітря, оскільки навіть дрібні бульбашки можуть призвести до появи пор і дефектів у готовій стрічці.

Далі відбувається формування стрічки методом лиття (tape casting). Процес проводять на спеціальній машині, де шлікер рівномірно наливається на рухому підкладку. Над поверхнею підкладки встановлений металевий ніж, який задає товщину шару.

Зазор між ножем і підкладкою регулюють залежно від бажаної товщини готової стрічки. Швидкість руху стрічки також має велике значення — занадто швидке лиття може спричинити хвилястість або нерівномірний розподіл матеріалу.

Після нанесення шлікеру стрічка проходить через зону сушіння, де з неї поступово випаровується розчинник. Сушіння проводять при контрольованій температурі, і при стабільній вологості повітря.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/ Б/ ОК29-2-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 67 / 5

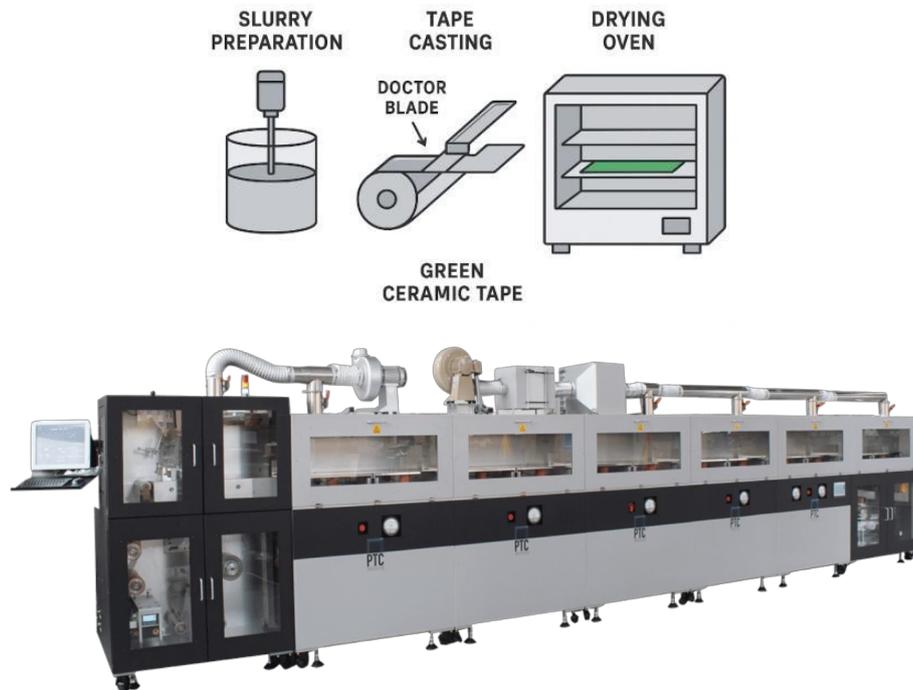


Рис.2.2 — Схема та обладнання формування керамічної стрічки

### Нарізання заготовок

Керамічна необпалена («сира») стрічка нарізається на окремі заготовки. На цьому етапі стрічку кераміки поділяють на окремі пластини потрібного розміру та форми.

Нарізання проводять різними способами: механічними різакми або роликковими ножами для простих форм, водяним струменем з абразивом для товстих листів або складних контурів, а також лазерним різанням для високої точності і мінімальних пошкоджень країв.

Після нарізання заготовки перевіряють на відповідність розмірам, рівність країв та відсутність тріщин або сколів, після чого вони готові до подальшої обробки та спікання.

У виробництві багат шарових керамічних плат використовуються заготовки наступних стандартних розмірів:

Таблиця 2.1 Стандартні розміри заготовок.

Исходный размер заготовки (дюймы)	Рабочая поверхность заготовки (дюймы)	Максимальный размер после отжига (дюймы)
6 x 6 - основной	4.7 x 4.7	4.5 x 4.5
8 x 8 - возможный	6.7 x 6.7	6.2 x 6.2

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/ Б/ ОК29-2-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 67 / 6

### Термостабілізація заготовок

Спочатку заготовки проходять попереднє висушування при відносно низьких температурах, що дозволяє повільно видалити вологу та уникнути тріщин або деформацій.

Після цього матеріал поступово нагрівають у термостатах або сушильних печах, забезпечуючи рівномірний розподіл тепла та стабілізацію структури. Досягнувши робочої температури, заготовки витримують певний час для

остаточного закріплення форми та повного видалення залишкової вологи. Після витримки слідує повільне охолодження до кімнатної температури,

оскільки різкий перепад може спричинити термічний шок і тріщини. У промислових умовах весь процес здійснюється у спеціальних печах із програмованим контролем температури, що забезпечує стабільність і повторюваність результату.

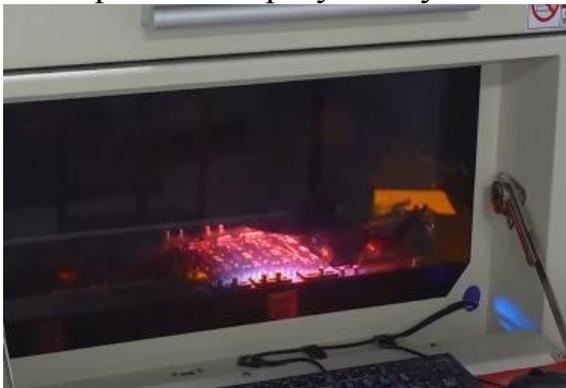


Рис.2.3 — Обладнання та схема термостабілізації.

### Формування перехідних контактних отворів

Перехідні контактні отвори в пакеті формуються в кожній окремо взятій заготовці. Процес формування контактних отворів на АТС відрізняється високим ступенем точності і відтворюваності. Використовуване високо прецизійне цифрове устаткування дозволяє АТС уникнути жорстких обмежень по покроковому розподілу отворів у вузлах "сітки" і відкриває можливості одночасного формування отворів різного діаметру, кроку, щільності розташування і величини співвідношення діаметру отворів до товщини початкової кераміки. Стандартні розміри діаметру отворів в заготовках 4, 6, 8,10,15 і 20 mil (мілідюймів).

Необхідно відзначити, що в процесі випалення пакету отвори, заповнені провідним матеріалом змінюють лінійні розміри від 4 до 7%, тоді як

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/ Б/ ОК29-2-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 67 / 7

навколишня керамічна матриця змінює відповідні розміри від 12 до 15%. Дуже близьке розташування отворів може привести до появи тріщин між ними в сирій заготівці, а занадто висока щільність розташування отворів може привести до спотворення геометричних координат поміжшарових з'єднань (стовбців) при випаленні. При виборі розмірів контактних отворів слід враховувати що використання отворів занадто малих діаметрів не завжди забезпечує надійну металізацію. Отвори занадто великого діаметру мають тенденцію до часткового "провалення" заповнення і його відділення від кераміки в процесі випалення. Отвори з величиною співвідношення товщини сирі кераміки до діаметру отвору більше 1, складні у формуванні і в заповненні. При збірці пакету нарощувані один над іншим "стовпи" не герметичні і можуть привести до неоднорідності профілю поверхні, тому рекомендується проводити зсув стовпів кожні 6-8 шарів. Використання дублюючих одну і ту ж функцію стовпів істотно збільшує надійність зборки.

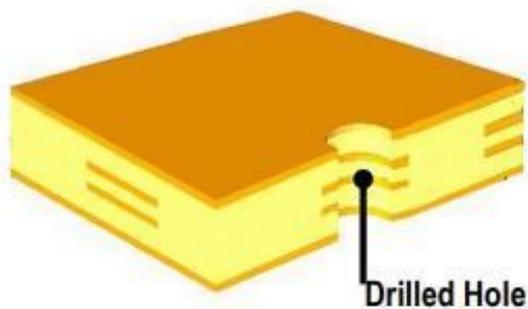


Рис.2.4 — Схема та формування перехідних контактних отворів.

### **Заповнення перехідних отворів електропровідним матеріалом**

Формування металізації перехідних отворів проводиться за допомогою заповнення отворів в керамічній заготівці спеціальними сумішами електропровідних матеріалів (пастою) з використанням технології шаблонного друку. При цьому використовуються високоточні шаблони, виготовлені з нержавіючої сталі.

Якість заповнення оцінюється по наступних параметрах:

- повнота заповнення перехідного отвору
- точність нанесення заповнюючого матеріалу.

Найбільш важливим чинником, що впливає на цей процес є співвідношення товщини використовуваної керамічної заготівки до діаметру заповнюваного отвору. Часто спостерігається невелике меніскоподібне викривлення перехідного отвору, викликане відмінністю термоусадних коефіцієнтів перехідного отвору і навколишньої кераміки.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/ Б/ ОК29-2-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 67 / 8

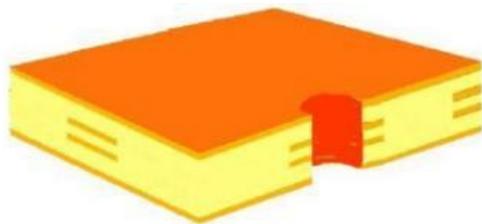


Рис.2.5 — Схема та формування заповнення отворів.

### Формування електропровідних ланцюгів (схем)

Електропровідні ланцюги (схеми) формуються методом трафаретного друку (шелкографії) на поверхні необпаленої керамічної заготовки. У порівнянні з традиційною товстоплівковою технологією перевагою даного методу є вища роздільна здатність друку ланцюгів, що обумовлена наступними чинниками:

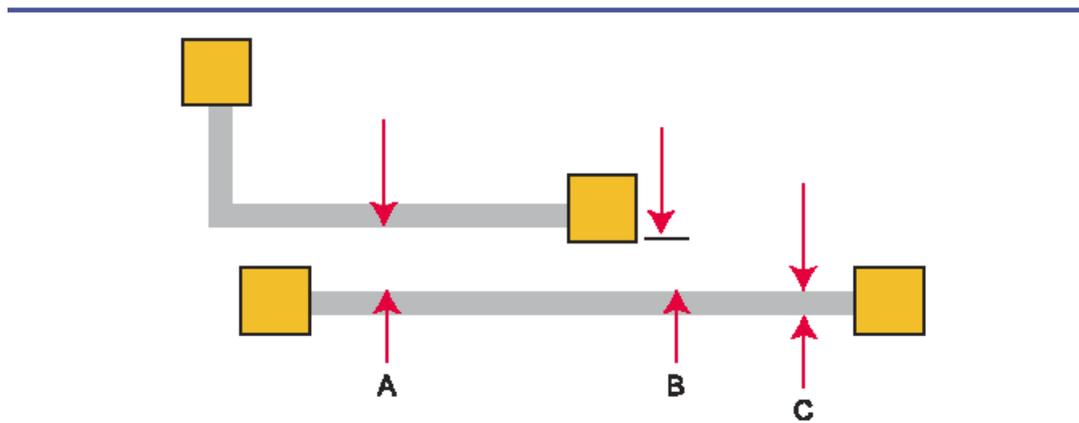
- друк проводиться на плоскій поверхні керамічної заготовки (відсутня топографія, характерна для товстоплівкової технології)
- електропровідні пасти наносяться на дрібнопористу поверхню, що перешкоджає їх розтіканню.



Рис.2.6 — Формування електропровідних ланцюгів.

При розводці ланцюгів визначальними чинниками є ширина і крок провідників, а також їх товщина (товщина нанесеної пасти).

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/ Б/ ОК29-2-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 67 / 9



	А(дюйми)	В(дюйми)	С(дюйми)
Бажані	$\geq 0,006$	$\geq 0,006$	$\geq 0,005$
Мак. Допустимі	0,005	0,005	0,004

Рис.2.7 — Основні параметри електропровідних ланцюгів.

### Формування вікон

Формування вікон у керамічних субстратах ( $Al_2O_3$ , AlN, BeO) є критичним етапом через крихкість та твердість матеріалу. Такі вікна потрібні для того, щоб у готовій платі залишилися відкритими ділянки, де згодом будуть монтуватися мікросхеми, резистори, конденсатори або інші компоненти, що не мають бути повністю вкриті керамічним матеріалом.

Процес починається на етапі підготовки окремих керамічних стрічок до ламінування. На кожному шарі, де за технологією мають бути вікна, розмічають місця їхнього розташування. Потім, за допомогою механічного висікання або лазерного вирізання, у сирій керамічній плівці виконуються необхідні прорізи. Лазерна технологія дозволяє отримати дуже точні контури без механічних пошкоджень, що особливо важливо для мікромонтажу.

#### 1. Лазерне скрайбування та свердління (Laser Drilling)

Використання CO<sub>2</sub> або УФ-лазерів для випаровування (абляції) кераміки. Створення мікровідворів (vias) діаметром менше 100 мкм та вікон складної форми з високою точністю. Безконтактний метод, відсутність зносу інструменту, можливість роботи з надтвердими матеріалами.

#### 2. Механічне фрезерування (Mechanical Milling)

Видалення матеріалу за допомогою алмазних свердел або фрез. Використовується для великих отворів (понад 0.2 мм), але обмежене через ризик появи мікротріщин у кераміці. Формування у «сирому» стані (Green Tape Processing) Отвори вирубуються в м'якій керамічній стрічці до її випалу при високих температурах (~1000°C). Масове виробництво багат шарових керамічних плат (LTCC/HTCC).

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/ Б/ ОК29-2-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 67 / 10

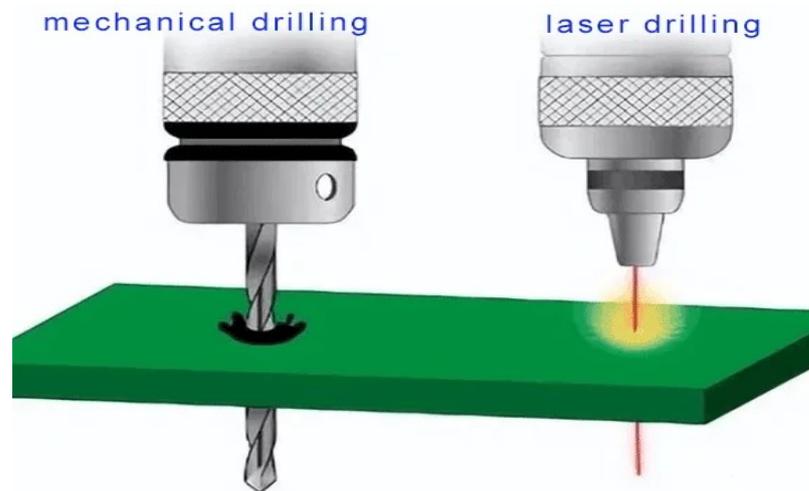


Рис.2.8 — Ілюстрація механічного та лазерного фрезерування.

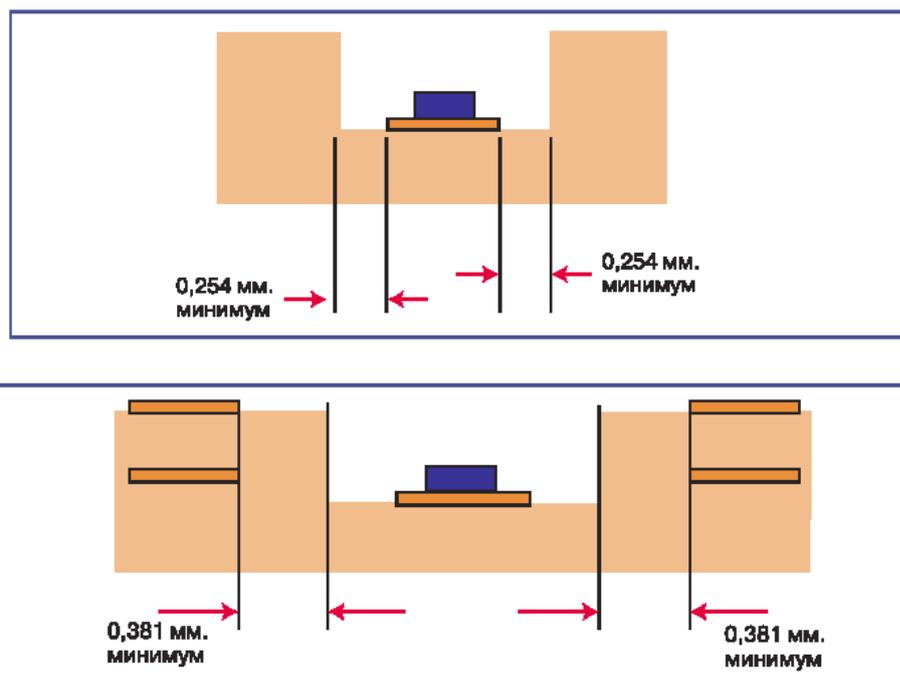


Рис.2.9 — Рекомендовані параметри виконання операції.

### Збірка та пресування пакету

Готові шари поміщаються в спеціальне пристосування, що забезпечує їх суміщення. На цьому етапі окремі шари кераміки, попередньо підготовлені та оснащені провідними доріжками, контактними отворами та вікнами під компоненти, поєднують у єдину багатошарову структуру формуючи об'ємну структуру керамічної плати.

Перед початком складання кожен шар очищають від пилу та залишків технологічних матеріалів, щоб забезпечити чисте та надійне з'єднання. Далі

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/ Б/ ОК29-2-2025
	<i>Випуск 1</i>	<i>Зміни 0</i>	<i>Екземпляр № 1</i>	<i>Арк 67 / 11</i>

проводять точне суміщення шарів за допомогою оптичних або механічних систем вирівнювання, орієнтуючись на спеціальні мітки. Це потрібно для того, щоб усі провідники, контактні отвори та вікна співпадали між собою без зміщень.

Після цього шари поступово накладають один на одного у визначеній послідовності, утворюючи пакет. У деяких випадках між ними можуть розміщуватися допоміжні плівки або прокладки, що забезпечують потрібну товщину або рівномірність структури. Зібраний пакет тимчасово фіксують легким пресуванням чи вакуумним притиском, аби уникнути зсувів перед остаточним ущільненням.



Рис.2.10 — Пресування пакету.

Готові шари поміщаються в спеціальне пристосування, що забезпечує їх поєднання. Після зборки пакет шарів проходить через спеціальне пресування при строго визначених тиску, температурі і тимчасових циклах. На цьому етапі пакет називається необпаленим.

### **Обрубкування пакету до процесу обпалення**

У тому випадку, коли конфігурація кінцевих модулів не є простою ортогональною структурою, проводиться вирубка окремих модулів з необпаленого пакету. Після складання пакет шарів проходить через спеціальне пресування при строго визначеному тиску, температурі і часовим циклі. Пакет поміщають у форму або між прокладками, щоб запобігти деформації країв. Далі його піддають дії гідравлічного чи термопреса для обрубкування.

Керамічний матеріал у цей момент поводить себе пластично — шари щільно прилягають один до одного, з'єднуючись на молекулярному рівні. Водночас важливо зберігати рівномірний тиск по всій площині, інакше можуть виникнути мікротріщини або перекося.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/ Б/ ОК29-2-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 67 / 12



Рис.2.11 — Обрубка пакету.

Температура й тиск підбираються так, щоб не пошкодити провідні доріжки та контактні отвори. Зазвичай тиск зростає поступово, утримується протягом певного часу, а потім плавно спадає — це дозволяє уникнути внутрішніх напружень і розшарування структури. Після пресування отримується щільна, стабільна заготовка з добре зафіксованими шарами, готова до фінального етапу — спікання, під час якого кераміка перетворюється на моноліт.

### Спікання

Для остаточного формування багатошарової керамічної плати необхідна термообробка пакету або окремих модулів. При цьому протікають два паралельні процеси - опалювання провідних малюнків і спікання керамічної маси. На першій стадії опалення також відбувається розкладання і видалення технологічної в'язки.

Спочатку відбувається обпалення (попереднє спікання). Заготовку повільно нагрівають у спеціальній печі, щоб видалити органічні сполуки, зв'язувальні речовини та залишки розчинників, які були присутні у керамічних стрічках і провідних пастах. Температура підвищується поступово, за суворо контрольованим графіком, щоб уникнути деформацій або утворення тріщин.

Далі настає спікання — основна термічна обробка, під час якої керамічні частинки з'єднуються між собою на атомному рівні.

У цей період структура ущільнюється, зменшується пористість, а об'єм заготовки трохи скорочується через усадку матеріалу. Водночас у провідних доріжках відбувається спікання металів, що утворюють міцні електричні зв'язки між шарами.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/ Б/ ОК29-2-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 67 / 13



Рис.2.12 — Піч для спікання LTCC.

Температурний режим та атмосфера печі (повітряна, азотна) підбираються залежно від типу кераміки й металізації, щоб запобігти окисленню чи деформації. Після завершення спікання заготовку повільно охолоджують, аби уникнути термічних напружень.

### **Нарізання обпаленого пакету на модулі**

Спечену або частково спечену керамічну заготовку розрізають на окремі функціональні елементи — модулі чи плати. Перед нарізанням заготовку ретельно перевіряють — визначають лінії різку, які зазвичай наносять ще на стадії проєктування. Від точності цих ліній залежить суміщення доріжок і контактних площадок на готових модулях.

Розрізання виконують за допомогою спеціальних високоточних верстатів — найчастіше лазерних або алмазних різаків. Лазерне нарізання забезпечує чистий зріз без утворення тріщин і пилу, що особливо важливо для тонких керамічних матеріалів. Якщо застосовують механічне різання, то процес проводиться з охолодженням, щоб уникнути перегріву та мікропошкоджень.

Після нарізання модулі піддаються очищенню від пилу та частинок, потім проводиться контроль розмірів і якості зрізів. Отримані елементи мають точні геометричні параметри, рівні краї та збережену електричну структуру доріжок.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/ Б/ ОК29-2-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 67 / 14

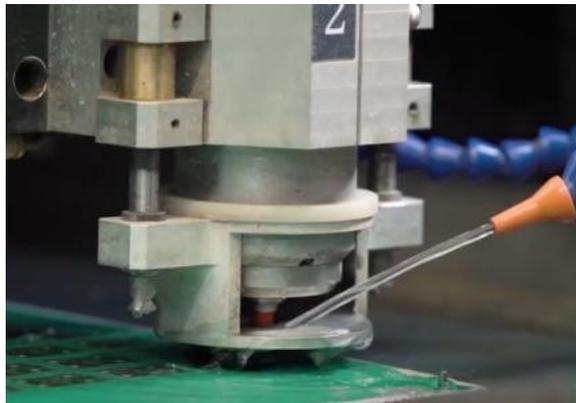


Рис.2.13 — Розрізання на модулі.

Розрізка обпаленого пакету на модулі проводиться діамантовими дисками, що забезпечують високу точність розмірів модулів. Цей процес застосовується для виготовлення модулів ортогональної конфігурації.

#### **Додаткові процеси після випалення пакету**

Після процесу обпалення на зовнішніх сторонах пакету можуть бути сформовані різні структури з використанням тонко- і товстоплівкової технології. Прикладами таких структур є селективні зони для паяння, термокомпресії, електроізоляції, а також пасивні компоненти типу конденсаторів резисторів і індуктивностей.

До складу процесу входять кілька основних операцій:  
- Плоске шліфування- застосовується для вирівнювання поверхонь і досягнення необхідної товщини модуля з допуском у межах декількох мікрометрів.

- Механічне або лазерне доведення контурів дозволяє скоригувати розміри після усадки, що відбувається під час спікання.

- Обробка отворів (зачистка, калібрування) здійснюється з метою забезпечення точного діаметра та гладкості стінок для подальшої металізації чи монтажу виводів.

- Очищення поверхонь — хімічне, плазмове або ультразвукове, для видалення залишків технологічних матеріалів, частинок пилу та оксидних плівок.

За потреби виконується гальванічне або вакуумне нанесення покриттів на контактні площадки (зазвичай Ni/Au, Ag або Pt/Pd), що покращує паяльність і корозійну стійкість. У завершальній стадії наносять лазерне маркування або ідентифікаційні знаки.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/ Б/ ОК29-2-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 67 / 15



Рис.2.14 — Нанесення захисної маски.

### Тестування і контроль модулів

Це завершальний етап виробництва керамічних плат, спрямований на перевірку їхньої якості та відповідності технічним вимогам.

Проводиться візуальний контроль поверхонь під мікроскопом для виявлення тріщин, розшарувань і дефектів металізації. Далі виконуються електричні випробування — перевірка цілісності провідних ланцюгів, опору та ізоляції між доріжками. За потреби застосовується рентгенівський контроль для оцінки внутрішньої структури і якості міжшарових з'єднань.

Також перевіряються геометричні параметри (товщина, площинність, точність отворів) та проводиться термоелектричне тестування для оцінки стабільності при зміні температури.

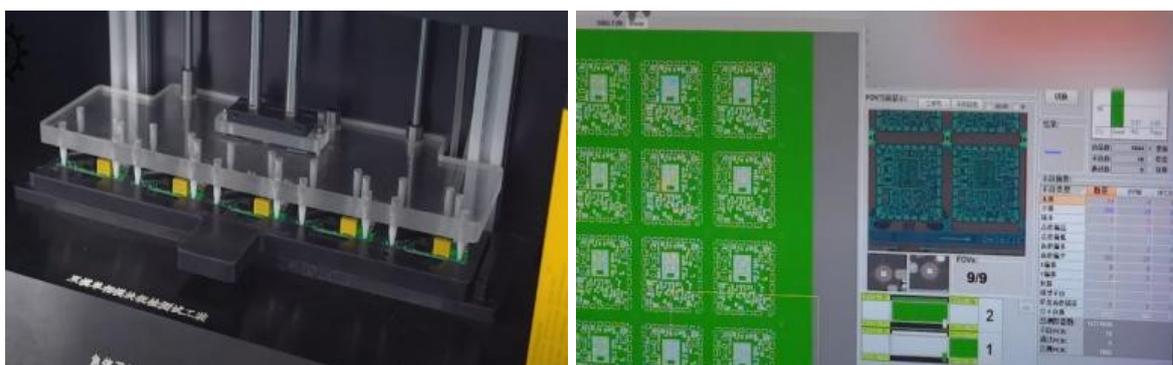


Рис.2.15 — електричне та ОТК тестування.

### Електрофізичні і механічні характеристики використаних матеріалів:

Таблиця 2.2. Характеристики матеріалів

Властивості	DuPont LL617
В'язкість, (Па·с, 10 об/хв, 25 °С) <sup>1</sup>	180-300
Твердість речовини, (%) <sup>2</sup>	73,5-75,5
Покриття, (см <sup>2</sup> /грам)	80-90
Розчинник для очищення	1-Пропокси 2-Пропонал

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/ Б/ ОК29-2-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 67 / 16

Розріджувач	8250
Роздільна здатність лінії/проміжку, (мкм, висушений)	250/250
Товщина сухого друку, (мкм)	22-25
Товщина спеченого друку, (мкм)	12-14
Опір, (МОм/кв.) <sup>3</sup>	</= 55
Прийнятність припою, (%) <sup>*</sup>	>/= 95
Початкова адгезія припою, (N)	>/= 25
Адгезія припою після старіння, (N)	>/= 15

Таблиця 2.3. Характеристики матеріалів

Властивості	DuPont 9K7
Товщина до випалу, (мкм)	127, +/-9 (9K7) \ 254, +/-14 (9K7X)
X, Y, усадка, (%) <sup>1</sup>	9,1, +/-0,3
Z усадка, (%) <sup>1</sup>	11,8, +/-0,5
TCE, (23°-300° C)	4,4
Щільність, (г/см <sup>3</sup> )	3,1
Вигин, (мкм/25 мм)	25
Шорсткість поверхні, (мкм)	0,52
Теплопровідність, (Вт/м-К)	4,6
Міцність на згин, (МПа)	230
Модуль Юнга, (ГПа)	145
Коефіцієнт Пуассона	0,25
Діелектрична проникність, (10 ГГц) <sup>2</sup>	7,1, +/-0,2
Тангенс втрат, (10 ГГц) <sup>2</sup>	0,0010
Опір ізоляції, (Ом)	> 1012
Напруга пробою, (кВ/25 мкм)	>/= 1100

### Порядок виконання роботи

1. Ознайомитись із основними етапами технологічного процесу виготовлення багатошарових керамічних друкованих плат.
2. Привести структурно-параметричний опис основного технологічного процесу (ТП):
  - а) Назва та порядок виконання технологічних операції (ТО) за основним ТП. Зміст операцій. (Представити у вигляді структурної схеми із зазначенням матеріальних потоків, що сполучають технологічні операції)

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/ Б/ ОК29-2-2025
	<i>Випуск 1</i>	<i>Зміни 0</i>	<i>Екземпляр № 1</i>	<i>Арк 67 / 17</i>

b) Назва та призначення (принцип дії) основного та допоміжного технологічного обладнання, що використовується при реалізації технологічних операції, загальні технічні характеристики обладнання.

c) Основні технологічні параметри, що контролюються при проходженні ТП із прив'язкою до обладнання, що їх забезпечують.

3. Зробити висновки по роботі.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/ Б/ ОК29-2-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 67 / 1

## Лабораторна робота №3 Гідравлічний розрахунок теплової мережі

Мета: Отримати навички статичного гідравлічного розрахунку теплової мережі та вибору її конструктивних елементів.

### Теоретичні відомості

Задача: Відповідно до власного варіанту виконати гідравлічний розрахунок теплової мережі опалення. Виконати попередній вибір діаметрів трубопроводу магістральної мережі та ділянок розподілення теплоносія, температуру теплоносія на початку та визначити його щільність. Перевірити швидкість руху теплоносія: для рідини не більше 3,5 м/с, для пара не більше 30 м/с. Визначити лінійні втрати тиску на ділянках трубопроводу. Обрати локальні опори на ділянках трубопроводу: компенсатори, засувки, відводи та визначити втрати тиску на них. Визначити сумарні втрати тепломережі і побудувати гідростатичний графік. Результати розрахунків навести у таблицю за ділянками тепломережі.

### Данні за варіантом:

Теплоносій	Початковий тиск, Мпа	№ варіанту	Витрати теплоносія споживачем (для пари – 10 <sup>-3</sup> )				
			1	2	3	4	5
вода	0,45	1	4	5	12	14	*
пара	0,72	2	1	15	6	2	10
вода	0,63	3	4	4	20	*	7
пара	0,35	4	10	12	1	*	1
вода	0,41	5	7	5	18	2	6
пара	0,82	6	6	6	13	7	*
вода	0,7	7	*	12	4	8	8
пара	1,1	8	9	*	21	20	*
вода	1,6	9	13	14	21	*	9
пара	1,4	10	8	2	*	12	8
вода	1,21	11	*	17	3	8	9
пара	0,9	12	6	*	11	6	2
вода	0,65	13	7	16	3	*	11
пара	0,45	14	11	13	*	11	3
вода	0,92	15	6	11	7	17	*
пара	0,68	16	12	6	*	7	8
вода	1,15	17	20	1	6	*	9
пара	0,98	18	5	*	13	7	4
вода	1,25	19	11	2	8	1	15
пара	1,3	20	*	7	21	6	14

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/ Б/ ОК29-2-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 67 / 2

Топологію тепломережі відтворити самостійно, керуючись вказівками викладача

Приклад розрахунку:

Теплоносій	Початковий тиск, МПа	Витрати теплоносія споживачами, т/ч				
		1	2	3	4	5
вода	0,65	3	3	4	30	-

Довжина ділянок, м						
1	2	3	4	5	6	7
120	300	250	400	25	80	16

Топологію мережі наведено на рисунку 4.1.

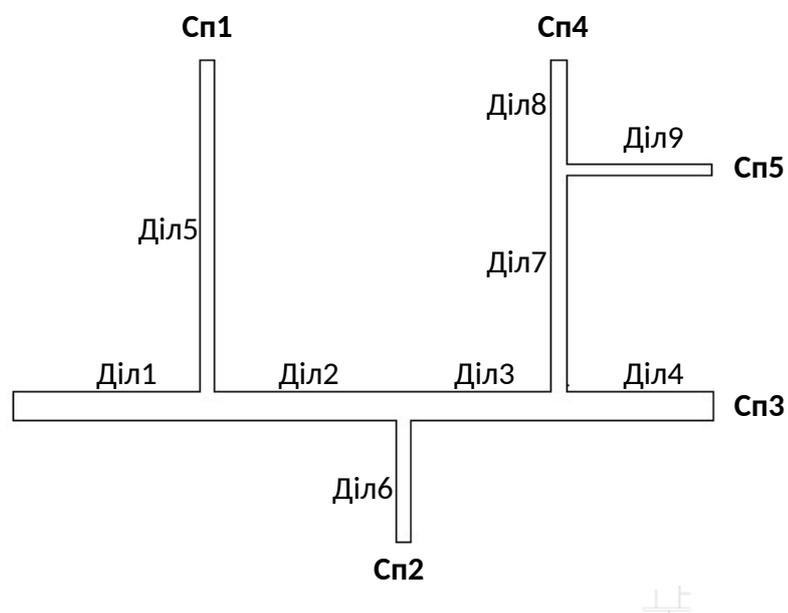


Рис 4.1 — Топологія розподіленої мережі

### Гідростатичний розрахунок мережі ГВС

Таблиця 4.1. Параметри мережі

№	Довжина, м	Діаметр трубопроводу, м	Витрати, т/год
1	153	238	0,03

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/ Б/ ОК29-2-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 67 / 3

2	167	238	0,022
3	143	238	0,02
4	122	-	-
5	200	153	0,008
6	82	69	0,002
7	172	238	0,02
8	86	153	0,012
9	95	153	0,008

Таблиця 4.2. Вхідні дані

Параметр	Позначення, одиниці виміру	Значення
Витрати пари на першій ділянці	G1, т/год	0,03
Витрати пари на другій ділянці	G2, т/год	0,022
Витрати пари на третій ділянці	G3, т/год	0,02
Витрати пари на четвертій ділянці	G4, т/год	-
Витрати пари на п'ятій ділянці	G5, т/год	0,008
Витрати пари на шостій ділянці	G6, т/год	0,002
Витрати пари на сьомій ділянці	G7, т/год	0,02
Витрати пари на восьмій ділянці	G8, т/год	0,012
Витрати пари на дев'ятій ділянці	G9, т/год	0,008
Тиск в магістралі	Pн, КПа	1400
Довжина ділянок	l, м	153
	l, м	167
	l, м	143
	l, м	122
	l, м	200
	l, м	82
	l, м	172
	l, м	86
	l, м	95
Щільність пари	$\rho_k$ , кг/м <sup>3</sup>	6,4
Допустима швидкість руху пари	W, м/с	30

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/ Б/ ОК29-2-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 67 / 4

## 1. Об'ємні витрати води на ділянках

Формула:  $V = G \cdot 1000 / \rho_k$

1 дл.  $V_1 = G_1 \cdot 1000 / \rho_k = 4,69 \text{ м}^3/\text{год.}$

2 дл.  $V_2 = G_2 \cdot 1000 / \rho_k = 3,44 \text{ м}^3/\text{год.}$

3 дл.  $V_3 = G_3 \cdot 1000 / \rho_k = 3,13 \text{ м}^3/\text{год.}$

4 дл.  $V_4 = G_4 \cdot 1000 / \rho_k = 0,0 \text{ м}^3/\text{год.}$  – споживання відсутнє

5 дл.  $V_5 = G_5 \cdot 1000 / \rho_k = 1,25 \text{ м}^3/\text{год.}$

6 дл.  $V_6 = G_6 \cdot 1000 / \rho_k = 0,31 \text{ м}^3/\text{год.}$

7 дл.  $V_7 = G_7 \cdot 1000 / \rho_k = 3,13 \text{ м}^3/\text{год.}$

8 дл.  $V_8 = G_8 \cdot 1000 / \rho_k = 1,88 \text{ м}^3/\text{год.}$

9 дл.  $V_9 = G_9 \cdot 1000 / \rho_k = 1,25 \text{ м}^3/\text{год.}$

## 2. Розрахунок діаметрів трубопроводів

Формула:  $d = \sqrt{4 \cdot W \cdot V / (3600 \cdot \pi)}$

1 дл.  $d_1 = \sqrt{4 \cdot 30 \cdot 4,69 / 3600 \cdot \pi} = 0,233 \text{ м}$

2 дл.  $d_2 = \sqrt{4 \cdot 30 \cdot 3,44 / 3600 \cdot \pi} = 0,191 \text{ м}$

3 дл.  $d_3 = \sqrt{4 \cdot 30 \cdot 3,13 / 3600 \cdot \pi} = 0,182 \text{ м}$

4 дл.  $d_4 = \sqrt{4 \cdot 30 \cdot 0 / 3600 \cdot \pi} = 0 \text{ м}$

5 дл.  $d_5 = \sqrt{4 \cdot 30 \cdot 1,25 / 3600 \cdot \pi} = 0,115 \text{ м}$

6 дл.  $d_6 = \sqrt{4 \cdot 30 \cdot 0,31 / 3600 \cdot \pi} = 0,057 \text{ м}$

7 дл.  $d_7 = \sqrt{4 \cdot 30 \cdot 3,13 / 3600 \cdot \pi} = 0,182 \text{ м}$

8 дл.  $d_8 = \sqrt{4 \cdot 30 \cdot 1,88 / 3600 \cdot \pi} = 0,141 \text{ м}$

9 дл.  $d_9 = \sqrt{4 \cdot 30 \cdot 1,25 / 3600 \cdot \pi} = 0,115 \text{ м}$

## 3. Вибір діаметру трубопроводів

1 дл.  $d_1 = 238 \text{ мм (244/3)}$

2 дл.  $d_2 = 238 \text{ мм (244/3)}$

3 дл.  $d_3 = 238 \text{ мм (244/3)}$

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/ Б/ ОК29-2-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 67 / 5

4 дл. d4=—

5 дл. d5=153 мм (159/3)

6 дл. d6=69 мм (73/2)

7 дл. d7=238 мм (244/3)

8 дл. d8=153 мм (159/3)

9 дл. d9=153 мм (159/3)

#### 4. Втрати тиску в трубопроводі

$$\Delta P = \Delta P_{\text{Л}} + \Delta P_{\text{М}}$$

##### 4.1 Лінійні втрати тиску на ділянках

$$\Delta P_{\text{Л}} = R_{\text{Л}} \cdot l, \quad R_{\text{Л}} = \frac{Ar \cdot b}{R} \cdot V_i^2 - \text{питоме падіння тиску, } Ar = 0,0000163$$

- коефіцієнт лінійної втрати тиску

$$1 \text{ дл. } \Delta R_{\text{Л}} = (0,0000163 \cdot 4,69^2 / 0,238^{5,25}) = 0,67 \text{ Па/м}$$

$$2 \text{ дл. } \Delta R_{\text{Л}} = (0,0000163 \cdot 3,44^2 / 0,238^{5,25}) = 0,36 \text{ Па/м}$$

$$3 \text{ дл. } \Delta R_{\text{Л}} = (0,0000163 \cdot 3,13^2 / 0,238^{5,25}) = 0,30 \text{ Па/м}$$

$$4 \text{ дл. } \Delta R_{\text{Л}} = 0 \text{ Па/м}$$

$$5 \text{ дл. } \Delta R_{\text{Л}} = (0,0000163 \cdot 1,25^2 / 0,153^{5,25}) = 0,49 \text{ Па/м}$$

$$6 \text{ дл. } \Delta R_{\text{Л}} = (0,0000163 \cdot 0,31^2 / 0,069^{5,25}) = 1,95 \text{ Па/м}$$

$$7 \text{ дл. } \Delta R_{\text{Л}} = (0,0000163 \cdot 3,13^2 / 0,238^{5,25}) = 0,30 \text{ Па/м}$$

$$8 \text{ дл. } \Delta R_{\text{Л}} = (0,0000163 \cdot 1,88^2 / 0,153^{5,25}) = 1,10 \text{ Па/м}$$

$$9 \text{ дл. } \Delta R_{\text{Л}} = (0,0000163 \cdot 1,25^2 / 0,153^{5,25}) = 0,49 \text{ Па/м}$$

##### 4.2 Втрати на місцевих опорах на ділянках

$$\Delta P_{\text{М}} = 0,8125 \cdot \sum \xi \cdot V^2 / (\rho \cdot d^4)$$

Коефіцієнти опору ( $\xi$ ):

1.  $\xi_{\text{В}} = 5$  (вентиль прохідний)
2.  $\xi_{\text{П}} = 2,8$  (П-подібний компенсатор)

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/ Б/ ОК29-2-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 67 / 6

### Результати ( $\Delta P_m$ , КПа):

- 1 дл.  $\Delta P_m = 0,8125 \cdot (2,8+5) \cdot 4,69^2 / (6,4 \cdot 0,238^4) = 6,8$  КПа
- 2 дл.  $\Delta P_m = 0,8125 \cdot (2,8+5) \cdot 3,44^2 / (6,4 \cdot 0,238^4) = 3,7$  КПа
- 3 дл.  $\Delta P_m = 0,8125 \cdot 5 \cdot 3,13^2 / (6,4 \cdot 0,238^4) = 3,0$  КПа
- 4 дл.  $\Delta P_m = 0$  КПа
- 5 дл.  $\Delta P_m = 0,8125 \cdot (2,8+5) \cdot 1,25^2 / (6,4 \cdot 0,238^4) = 2,8$  КПа
- 6 дл.  $\Delta P_m = 0,8125 \cdot 5 \cdot 0,31^2 / (6,4 \cdot 0,238^4) = 4,2$  КПа
- 7 дл.  $\Delta P_m = 0,8125 \cdot (2,8+5) \cdot 3,13^2 / (6,4 \cdot 0,238^4) = 3,0$  КПа
- 8 дл.  $\Delta P_m = 0,8125 \cdot 5 \cdot 1,88^2 / (6,4 \cdot 0,238^4) = 6,4$  КПа
- 9 дл.  $\Delta P_m = 0,8125 \cdot 5 \cdot 1,25^2 / (6,4 \cdot 0,238^4) = 2,8$  КПа

### 4.3 Сумарні втрати тиску в трубопроводі.

Загальна формула для кожної ділянки:

$$\Delta P = \Delta P_L + \Delta P_m$$

### Результати розрахунків по ділянках:

- 1 дл.  $\Delta P = 0,1028 + 6,8 = 6,9$  КПа
- 2 дл.  $\Delta P = 0,0604 + 3,7 = 3,7$  КПа
- 3 дл.  $\Delta P = 0,0428 + 3,0 = 3,1$  КПа
- 4 дл.  $\Delta P = 0$  КПа
- 5 дл.  $\Delta P = 0,0971 + 2,8 = 2,9$  КПа
- 6 дл.  $\Delta P = 0,1602 + 4,2 = 4,4$  КПа
- 7 дл.  $\Delta P = 0,0515 + 3,0 = 3,1$  КПа
- 8 дл.  $\Delta P = 0,0945 + 6,4 = 6,5$  КПа
- 9 дл.  $\Delta P = 0,0461 + 2,8 = 2,9$  КПа

Таблиця 4.3. Дані для побудови падіння гідростатичного тиску

Ділянка	Тиск P, КПа	Відстань l, м
1	1400	0
1	1393,1	153

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/ Б/ ОК29-2-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 67 / 7

2	1393,1	153
2	1389,4	320
3	1389,4	320
3	1386,4	463
4	1386,4	463
4	1386,4	585
5	1393,1	153
5	1390,3	353
6	1389,4	320
6	1385	402
7	1386,4	463
7	1383,3	635
8	1383,3	635
8	1376,8	721
9	1383,3	635
9	1380,4	730

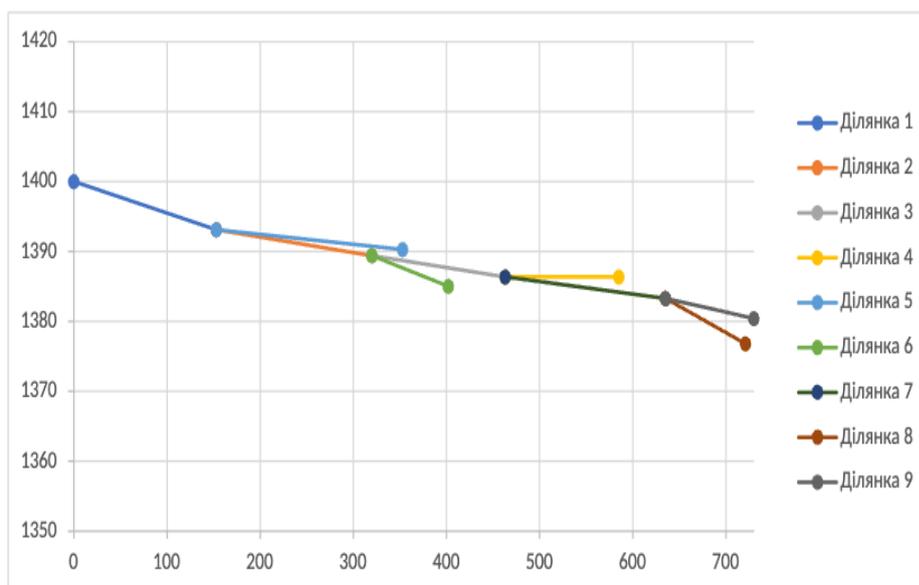


Рис.4.2 — Падіння гідростатичного тиску

### Порядок виконання роботи

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/ Б/ ОК29-2-2025
	<i>Випуск 1</i>	<i>Зміни 0</i>	<i>Екземпляр № 1</i>	<i>Арк 67 / 8</i>

1. Ознайомитись із прикладом гідравлічного розрахунку теплової мережі.
2. За отриманим викладачем варіантом формувати топологію та визначити довжини ділянок магістралі.
3. Розрахувати об'ємні витрати на ділянках.
4. Розрахувати та вибрати діаметри трубопроводу на ділянках.
5. Розрахувати лінійні та місцеві втрати тиску на ділянках трубопроводу.
6. Побудувати графік падіння гідростатичного тиску на ділянках трубопроводу.
7. Зробити висновки по роботі.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/ Б/ ОК29-2-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 67 / 1

## Лабораторна робота № 4

### Основи розрахунку та вибору основних елементів парової котельні

Мета: Ознайомитися з типовим розрахунком і вибором котельної установки з паровими котлами.

#### Теоретичні відомості

На теплових схемах котелень показується основне і допоміжне обладнання, об'єднуються лініями трубопроводів для транспорту теплоносіїв у вигляді пари і води. На принциповій теплової схемою вказується лише головне обладнання - котли, підігрівачі, деаератори, насоси та основні трубопроводи - без арматури, всіляких допоміжних пристроїв і другорядних трубопроводів, не уточнюються кількість і розташування обладнання. Після розробки принципової теплової схеми котельні та її розрахунків вибирається необхідне обладнання котельні. Метою розрахунку теплової схеми є визначення загальних теплових навантажень - зовнішніх і витрат теплоти на власні потреби котельні та розподіл навантажень між парової і водогрійної частинами навантажень; визначення всіх теплових і масових потоків, необхідних для вибору допоміжного устаткування і діаметрів трубопроводів і арматури; визначення даних для подальших техніко-економічних розрахунків.

Розрахунок теплової схеми котельні дає можливість визначити сумарну теплову потужність котельні при різних режимах роботи. З певних сумарним витратам пари та гарячої води і виду палива виробляється вибір типу, продуктивності і кількості котлів. У котельних з загальною тепловою потужністю (пара і гаряча вода) приблизно до 210 ГДж / год рекомендується встановлювати тільки парові котли, а гарячу воду для потреб опалення, вентиляції та гарячого водопостачання отримувати від пароводяних підігрівачів. Для потужних котелень тепловою потужністю понад 420 ГДж / год може виявитися раціональним застосування комбінованих парових котлів з гнучкою регулюванням парової і водогрійної навантаженням. Після вибору котлів проводиться вибір всього необхідного для їх допоміжного обладнання, т. Е. Теплообмінних апаратів, апаратури водопідготовки, насосів, баків та ін. Все вибрання обладнання наноситься на теплову схему. Умовними лініями зображують трубопроводи для різного виду рідин, пари та газу. Складні теплові схеми котелень з паровими, водогрійними і пароводогрійних котлами визначають необхідність розрахунку теплових схем методом послідовних наближень. Для кожного елемента теплової схеми складають рівняння матеріального і теплового балансів, вирішення яких дозволяє визначити

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/ Б/ ОК29-2-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 67 / 2

невідомі витрати і ентальпії середовищ. Загальна ув'язка цих рівнянь здійснюється складанням матеріального і теплового балансів деаератора, в якому сходяться основні потоки робочого тіла. Ряд значень величин, необхідних для ув'язки теплової схеми, отримують з розрахунку її елементів і пристроїв. Поруч значень величин можна попередньо задаватися. Наприклад, на деаерацію живильної води і підігрів сирової і хімічної води при закритій системі водопостачання від 7 до 10% сумарного відпуску теплової енергії зовнішнім споживачам; на втрати теплоти всередині котельні 2 - 3% тієї ж величини.

При розрахунках теплової схеми зазвичай задаються температурою води, що йде на хімічну водоочистку, 20 - 30 ° С; вихідної води взимку - 5 ° С. Вважають втрати води в теплових мережах при закритій системі гарячого водопостачання рівними 0,5% обсягу води в мережах, або 1,5 - 2% годинної витрати води в мережі.

Принципова тепла схема котельні з паровими котлами показана на малюнку.

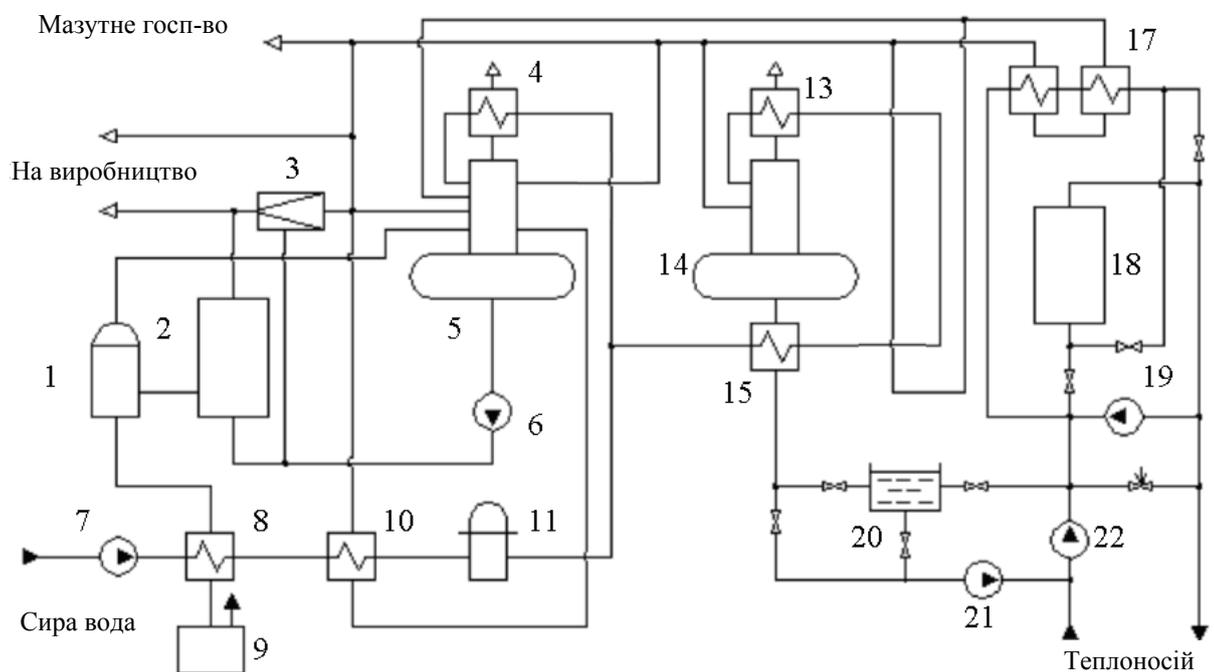


Рис.5.1 — Теплова схема котельної установки з паровими и водогрійними котлами.

Позначення основних елементів системи:

- 1.Расширювач безперервного продування
- 2.Паровий котел
- 3.РОУ

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/ Б/ ОК29-2-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 67 / 3

4. Охолоджувач випару
5. Деаератор живильної води
6. Живильний насос
7. Насос сирі води
8. Охолоджувач продувочної води
9. Продувочний колодязь
10. Підігрівач сирі води
11. Хімводоочістка
12. Подопідігрівач ХВО
13. Охолоджувач випару
14. Деаератор підживлювальної води
15. Охолоджувач підживлювальної води
16. Підігрівач підживлювальної води
17. Мережевий підігрівач
18. Водогрійний котел
19. Рециркуляційний насос
20. Бак-акумулятор
21. Підживлюючий насос
22. Мережевий насос

### ЗАВДАННЯ

Відповідно до свого варіанту провести розрахунок теплової схеми котельні з паровими котлами для одного з режимів (максимально-зимового періоду, періоду найбільш холодного місяця, літнього періоду). Вибрати число і потужність парових котлів. Проаналізувати завантаження котлів для зазначеного режиму. Небаланс по теплоносія звести до 0,1%. При виборі числа і потужності котлів слід враховувати зменшення навантаження на опалення та вентиляцію для найбільш холодного місяця на 40%. Орієнтовно розрахувати завантаження котлів у всіх режимах.

№	Населений пункт	Вид палива	$D'_t$ , т/г	$P_{пер}$ , МПа	$D_t$ , т/г	$P_{нас}$ , МПа	$Q_{об}$ , МВт	$Q_{гв}$ , МВт
	Рудня	деревина	-	-	-	0,4	33	3

Наведемо порядок розрахунку. Вихідні дані представимо в табличній формі

Таблиця 5.1. Розрахунок теплової системи

№	Назва параметра	Позначення	Отримання	Значення
1	Температура прямої мережевої води, °C	t1	Задана	106
2	Температура поверненої мережевої води, °C	t2	Задана	72
3	Розрахункове теплове навантаження споживачів	Q	Задана	36

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/ Б/ ОК29-2-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 67 / 4

	системи теплопостачання, МВт			
4	Коефіцієнт витрат пари на власні потреби, %	Квп	Прийнята	5
5	Процент повернення конденсату технологічними споживачами	$\beta$	Задана	0,5
6	Ентальпія редукованої пари, КДж/кг	$h_{pou}''$	Таблиця	2738
7	Температура сирій води, °С	$t_{св}$	Прийнята	5
8	Температура живильної води, °С	$t_{пв}$	Прийнята	104
9	Процент неперервної продувки котлів	Рпр	Прийнята	2
10	Ентальпія котлової води, КДж/кг	$h_{кв}$	Прийнята	830
11	Ступінь сухості пари	X	Прийнята	0,98
12	Ентальпія пари на виході з розширювача неперервної продувки, КДж/кг	$h_{розш}''$	Прийнята	2680
13	Температура хімічно очищеної води перед охолоджувачем деаерованої води, °С	$t_{хов}'$	Прийнята	20
14	Температура конденсату, °С	$t_k$	Задана	72
15	Ентальпія конденсату, КДж/кг	$h_k$	Таблиця	366
16	Температура води після охолоджувача неперервної продувки, °С	$t_{пр}$	Прийнята	99
17	Ентальпія конденсату при P=0,4 МПа, КДж/кг	$h_k_{pou}$	Таблиця	608
18	КПД підігрівачів	$\eta$	Прийнята	0,98
19	Коефіцієнт втрат конденсату в циклі котельної, %	Кк	Прийнята	3
20	Коефіцієнт витрат пари на покриття втрат в котельній, %	Кп	Прийнята	2
21	Коефіцієнт власних потреб	Кхв	Прийнята	1,1
22	Ентальпія води отриманої в розширювачі неперервної продувки, КДж/кг	$h_{розш}'$	Таблиця	417
23	Ентальпія хімічно очищеної води перед підігрівачем, КДж/кг (після охолоджувача підживлювальної води)	$h_{хов}''$	Таблиця	214
24	Коефіцієнт втрати в тепловій мережі	Ктс	Прийнята	1,5

### 1. Витрати мережевої води:

$$G = \frac{860 * Q}{t_1 - t_2} = 860 * 36 / (106 - 72) = 910,6 \text{ т/год.}$$

### 2. Витрати пари на підігрівачі мережевої води:

$$D_{пмв} = \frac{4,2 * G * (t_1 - t_2)}{\eta * (h''_{pou} - h_k)} = 4,2 * 910,6 * (106 - 72) / (0,98 * (2738 - 366)) = 55,9 \text{ т/год.}$$

### 3. Витрати редукованої пари зовнішнім споживачем:

$$D''_{pou} = D_{пмв} = 55,9 \text{ т/год.}$$

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/ Б/ ОК29-2-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 67 / 5

#### 4. Сумарні витрати свіжої пари зовнішнім споживачем:

$$D_{зв} = \frac{D''_{роу} * (h''_{роу} - h'_{нв})}{h'_{роу} - h_{нв}} = 55,9 * (2738 - 437) / (2786 - 437) = 54,8 \text{ т/год.}$$

#### 5. Кількість води, виприскуваної в РОУ:

$$G_{роу} = D'_{роу} * \frac{h'_{роу} - h''_{роу}}{h'_{роу} - h_{нв}} = 55,9 * (2738 - 2738) / (2786 - 437) = 1,1 \text{ т/год.}$$

#### 6. Витрати пари на власні потреби котельної:

$$D'_{ен} = 0,01 * K_{ен} * D_{зв} = 0,01 * 5 * 54,8 = 2,7 \text{ т/год.}$$

#### 7. Витрати пари на покриття втрат в котельній:

$$D_n = 0,01 * K_n * (D_{зв} + D'_{ен}) = 0,01 * 2 * (54,8 + 2,7) = 1,2 \text{ т/год.}$$

#### 8. Сумарні витрати на власні потреби і покриття втрат в котельній:

$$D_{ен} = D_n + D'_{ен} = 1,2 + 2,7 = 3,9 \text{ т/год.}$$

#### 9. Сумарна паропроодуктивність котельної:

$$D = D_{зв} + D_{ен} = 54,8 + 3,9 = 58,7 \text{ т/год.}$$

#### 10. Втрати конденсату в обладнанні котельної і зовнішніх споживачів:

$$G_k^{nod} = 0,01 * K_k * D = 0,01 * 3 * 58,7 = 1,8 \text{ т/год.}$$

#### 11. Витрати хімічно очищеної води:

$$G_{хов} = G_k^{nod} + 0,01 * K_{мс} * G = 1,8 + 0,01 * 1,5 * 910,6 = 15,4 \text{ т/год.}$$

#### 12. Витрати сирій води:

$$G_{св} = K_{хв} * G_{хов} = 1,1 * 15,4 = 17 \text{ т/год.}$$

#### 13. Кількість води, що поступає з розширювача неперервної продукції:

$$G_{пр} = 0,01 * p_{пр} * D = 0,01 * 2 * 58,7 = 1,2 \text{ т/год.}$$

#### 14. Кількість пари отриманої в розширювачі неперервної продукції:

$$D_{розш} = \frac{G_{пр} * (h_{кв} - h'_{розш})}{x * (h''_{розш} - h'_{розш})} = (1,2 * (830 - 417)) / (0,98 * (2680 - 417)) = 0,2 \text{ т/год.}$$

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/ Б/ ОК29-2-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 67 / 6

### 15. Кількість води на виході з розширювача неперервної продувки:

$$G_{розш} = G_{пр} - D_{розш} = 1,2 - 0,2 = 1 \text{ т/год.}$$

### 16. Температура сирої води на виході з охолоджувача неперервної продувки:

$$t'_{св} = \frac{G_{розш} * (h'_{розш} * \eta - h_{пр})}{4,2 * G_{св}} + t_{св} = (1 * (417 * 0,98 - 207)) / (4,2 * 17) + 5 = 7,8 \text{ } ^\circ\text{C}$$

### 17. Витрати пари на підігрівач сирої води:

$$D_{св} = \frac{(h'_{хов} - h_{св}) * G_{св}}{(h''_{роу} - h_{к\ роу}) * \eta} = ((80 - 39) * 17) / (0,98 * (2738 - 608)) = 0,3 \text{ т/год.}$$

### 18. Температура хімічно очищеної води після охолоджувача підживлювальної води:

$$t''_{хов} = t'_{хов} + \frac{0,01 * K_{мс} * G * (t_{нев} - t_2) * \eta}{G_{хов}} = 20 + (0,01 * 1,5 * 910,6 * (106 - 72) * 0,98) / 15,4 = 49,5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

### 19. Витрати пари на підігрів хімічно очищеної води в підігрівачі перед деаератором:

$$D_{хов} = \frac{G_{хов} * (h_{к} - h''_{хов})}{(h''_{роу} - h_{к\ роу}) * \eta} = ((366 - 214) * 15,4) / (0,98 * (2738 - 608)) = 1,1 \text{ т/год.}$$

### 20. Сумарна кількість пари і води що поступає в деаератор, не враховуючи гріючий пар:

$$G_{\delta} = G_{хов} + D_{хов} + D_{пмв} + D_{св} + D_{розш} = 15,4 + 1,1 + 55,9 + 0,3 + 0,2 = 72,9 \text{ т/год.}$$

### 21. Середня температура в деаераторі, не враховуючи гріючий пар:

$$t'_{\delta} = \frac{(G_{хов} + D_{пмв}) * h_{к} + (D_{хов} + D_{св}) * h_{к}^{роу} + D_{розш} * h''_{розш}}{4,2 * G_{\delta}} =$$

$$= (((15,4 + 55,9)) * 366 + ((1,1 + 0,3)) * 608 + 0,2 * 2680) / (4,2 * 72,9) = 89,7 \text{ м/год.}$$

### 22. Витрати гріючої пари на деаератор:

$$D_{\delta} = \frac{(h_{нев} - 4,2 * t'_{\delta}) * G_{\delta}}{(h''_{роу} - h_{нев}) * \eta} = ((437 - 4,2 * 89,7) * 72,9) / ((2738 - 437) * 0,98) = 1,9 \text{ т/год.}$$

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/ Б/ ОК29-2-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 67 / 7

### 23. Витрати редукованої пари на власні потреби котельної:

$$D_{роу}^{ен} = D_{д} + D_{хов} + D_{св} = 1,9 + 1,1 + 0,3 = 3,3 \text{ т/год.}$$

### 24. Витрати свіжої пари на власні потреби котельної:

$$D_{ен} = \frac{(h'_{роу} - h_{не}) * D_{роу}^{ен}}{h'_{роу} - h_{не}} = ((2738 - 437) * 3,3) / (2786 - 437) = 3,2 \text{ т/год.}$$

### 25. Дійсна паропродуктивність котельної, враховуючи витрати пари на власні потреби:

$$D_x = (D_{зв} + D_{ен}) + 0,01 * k * (D_{зв} + D_{ен}) = (54,8 + 3,2) + 0,01 * 2 * (54,8 + 3,2) = 59,2 \text{ т/год.}$$

### 26. Небаланс попередньо прийнятої паропродуктивності котельної:

$$\Delta D = \frac{D - D_x}{D_x} * 100 = (58,7 - 59,2) / 59,2 * 100 = -0,8446 \%$$

Розрахунок закінчено, небаланс не перевищує 1%.

### Вибір парових котлів

Режим	1	2	3
Паропродуктивність, т/год.	59,2	37,5	5,0

Вибрано парові котли Е(аналогДЕ)-16-1,4 паропродуктивністю 16 т/год.

3.  $4 * 16 = 64 \text{ т/ГОД.}$  — завантаженість становить **92,5%**
4.  $3 * 16 = 48 \text{ т/ГОД.}$  — завантаженість становить **78,125%**
5.  $1 * 16 = 16 \text{ т/ГОД.}$  — завантаженість становить **31,25%**

В максимально зимовому режимі працюватимуть **4 котла.**

В режимі найбільш холодного місяця **3 котла.**

Літом працює **1 котел.**

### Порядок виконання роботи

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/ Б/ ОК29-2-2025
	<i>Випуск 1</i>	<i>Зміни 0</i>	<i>Екземпляр № 1</i>	<i>Арк 67 / 8</i>

1. Ознайомитись із прикладом розрахунку парової котельні.
2. За отриманим викладачем варіантом навест вихідні дані у формі таблиці за зразком
3. Провести розрахунок основних вузлів за зразком.
4. Перевірити небаланс теплових витрат для режиму максимального навантаження.
5. Зробити висновки по роботі.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/ Б/ ОК29-2-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 67 / 9

Лабораторна робота № 5  
**Тема: Дослідження процесу тонкого фільтрування води  
на ТОВ «Магія комфорту»**

Мета: Ознайомитися з основними етапами і технологічними параметрами процесу тонкого фільтрування води.

### Теоретичні відомості

Дослідження процесів тонкого фільтрування води на базі ТОВ «Магія комфорту» (Центр Фільтрації Води, м. Житомир) базується на синергії методів фізичного розділення, адсорбції та мембранної дифузії, що адаптовані до специфіки гідрохімічного складу підземних та поверхневих вод регіону. Технологія механічного очищення як початковий етап тонкого фільтрування реалізується через використання багат шарових мультимедійних систем або картриджних елементів із градієнтною пористістю. В основі процесу лежить затримання часток розміром від 1 до 20 мкм за рахунок механічного ситування та ефектів інерційного зіткнення. Для систем високої продуктивності, які впроваджує компанія, критичним є параметр швидкості лінійної фільтрації ( $V$ ), що для тонких механічних фільтрів зазвичай не перевищує 10-15 м/год, а також моніторинг перепаду тиску ( $\Delta P$ ). Зростання  $\Delta P$  понад 0,5-0,8 бар свідчить про насичення фільтруючого шару та необхідність автоматичного промивання або заміни витратних матеріалів. Важливим аспектом є використання дискових фільтрів з об'ємним затриманням бруду, де стиснені пакети дисків створюють складну тривимірну мережу каналів, що забезпечує глибинне очищення. Наступний рівень очищення в інженерних рішеннях «Центру Фільтрації Води» представлений фільтраційними колонами, які виконують роль контактних реакторів та адсорберів. Технологія базується на об'ємному фільтруванні крізь зернисте завантаження (наприклад, активоване вугілля, каталітичні матеріали або багатокомпонентні суміші типу Ecomix). Процес видалення заліза, марганцю та органічних сполук у колонах супроводжується складними фізико-хімічними взаємодіями: каталітичним окисненням на поверхні зерен та подальшим затриманням осадів у міжзерновому просторі. Ключовим технологічним параметром тут є час контакту, який розраховується як відношення об'єму завантаження до швидкості потоку. Ефективність роботи колон безпосередньо залежить від режиму регенерації, що керується автоматичними клапанами за об'ємом або часом. Під час циклу зворотного промивання шар завантаження переходить у стан «киплячого

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/ Б/ ОК29-2-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 67 / 10

шару», що дозволяє ефективно видалити накопичені забруднення в дренаж, відновлюючи гідравлічну проникність системи.

Осмотичне фільтрування є завершальним та найбільш технологічним етапом у ланцюгу водопідготовки ТОВ «Магія комфорту». В основі технології зворотного осмосу лежить принцип тангенціальної (перехресної) фільтрації, де потік води розділяється на пермеат (очищену воду) та концентрат (розчин із високим вмістом солей). На відміну від тупикового фільтрування, тангенціальний потік постійно омиває поверхню напівпроникної мембрани, мінімізуючи накопичення відкладень. Процес вимагає створення робочого тиску (від 7 до 15 бар для побутових та напівпромислових систем), який значно перевищує природний осмотичний тиск розчинених солей. Основними характеристиками процесу є селективність (здатність мембрани затримувати іони, що досягає 99,8%) та вихід пермеату, який зазвичай становить 50-75%. Дослідження цього етапу фокусується на запобіганні концентраційній поляризації — явищу накопичення солей біля поверхні мембрани, що може призвести до утворення відкладень кальцію та магнію. Для запобігання цьому компанія впроваджує дозування антискалантів та попереднє пом'якшення води в колонах.

Інтеграція цих трьох рівнів фільтрування в єдину автоматизовану систему дозволяє ТОВ «Магія комфорту» забезпечувати стабільну якість води навіть при коливаннях показників у вихідному джерелі. Технологічний цикл замикається системою контролю якості, де параметри електропровідності (TDS) пермеату після осмотичної мембрани слугують головним індикатором ефективності всієї системи тонкого очищення. Науково-практичний підхід компанії полягає у прецизійному підборі фільтруючих середовищ та налаштуванні гідравлічних режимів під конкретні потреби клієнта, що забезпечує довговічність обладнання та мінімізацію витрат на його експлуатацію.

### **Порядок виконання роботи**

4. Ознайомитись із основними етапами технологічного процесу тонкої фільтрації води.
5. Привести структурно-параметричний опис основного технологічного процесу (ТП):
  - а) Назва та порядок виконання технологічних операції (ТО) за основним ТП. Зміст операцій. (Представити у вигляді структурної схеми із зазначенням матеріальних потоків, що сполучають технологічні операції)

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/ Б/ ОК29-2-2025
	<i>Випуск 1</i>	<i>Зміни 0</i>	<i>Екземпляр № 1</i>	<i>Арк 67 / 11</i>

- b) Назва та призначення (принцип дії) основного та допоміжного технологічного обладнання, що використовується при реалізації технологічних операцій, загальні технічні характеристики обладнання.
- с) Основні технологічні параметри, що контролюються при проходженні ТП із прив'язкою до обладнання, що їх забезпечують.
6. Зробити висновки по роботі.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/ Б/ ОК29-2-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 67 / 12

## Лабораторна робота № 6

### Тема: Дослідження технологічного процесу виготовлення скляної тари на ПАТ «Біо Мед Скло»

Мета: Ознайомитися з основними етапами і технологічними параметрами процесу виготовлення скляних виробів.

### Теоретичні відомості

Виробництво скляної тари - це безперервний, енергомісткий і високоавтоматизований процес, що базується на термічній переробці мінеральної сировини. На підприємстві «Біомедскло», яке спеціалізується на медичному та харчовому склі, особлива увага приділяється хімічній стійкості та геометричній точності виробів.

#### 1. Підготовка сировинних матеріалів та приготування шихти

Фундаментом якості скла є шихта - однорідна механічна суміш компонентів. Процес починається у шихтному цеху, де реалізуються наступні етапи:

- Компонентний склад:** Основними інгредієнтами є кварцовий пісок ( $\text{SiO}_2$ ), кальцинована сода ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ), вапняк ( $\text{CaCO}_3$ ), доломіт та польовий шпат. Для спеціальних видів скла додаються освітлювачі (сульфат натрію) та барвники.

- Підготовка:** Сировина проходить через стадії очищення від залізистих домішок (магнітна сепарація), сушіння та розмелювання до певної фракції. Оптимальний зерновий склад забезпечує рівномірне плавлення.

- Дозування та змішування:** Сучасні вагові дозатори з комп'ютерним керуванням відміряють кожен компонент з точністю до 0,1%. Змішування відбувається у змішувачах примусової дії до досягнення гомогенності понад 98%.

- Використання склобою:** У шихту додається від 20% до 40% (іноді більше) очищеного скляного брухту. Це знижує температуру варіння, економить енергію та зменшує викиди  $\text{CO}_2$ .

#### 2. Процес варіння скла (скловаріння)

Підготовлена шихта завантажується у скловарну піч безперервної дії. Це складна теплотехнічна споруда, де під впливом високих температур (до

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/ Б/ ОК29-2-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 67 / 13

1550°C) відбуваються складні фізико-хімічні перетворення, що поділяються на п'ять стадій:

**1.Силікатоутворення:** При температурі 800–900°C компоненти вступають у реакцію, утворюючи силікати. Суміш перетворюється на спікшуся масу, виділяється велика кількість газів.

**2.Склоутворення:** При 1100–1200°C залишки кварцу розчиняються у силікатній масі. Маса стає прозорою, але залишається неоднорідною та насиченою бульбашками.

**3.Освітлення (Дегазація):** Температура піднімається до максимуму (1450–1550°C). В'язкість скла знижується, що дозволяє газовим включенням виходити на поверхню.

**4.Гомогенізація:** Завдяки конвекційним потокам та термічному перемішуванню хімічний склад скла вирівнюється. Маса стає однорідною за показником заломлення та в'язкістю.

**5.Стуження (Кондиціювання):** Склomаса поступово охолоджується до температури 1200–1300°C, набуваючи в'язкості, необхідної для транспортування до формувальних машин.

6.

### **3. Транспортування та термічне кондиціювання (Живильники)**

З печі скломаса потрапляє у **фідери (живильники)**. Це довгі канали з футерованим вогнетривом дном та системою пальників або електропідігріву. При цьому забезпечується абсолютна температурна рівномірність скла по всьому перерізу потоку. Навіть різниця у 1-2°C може призвести до різностінності готової пляшки. У кінці живильника розташована чаша з отвором (очком). Плунжер (керамічний стрижень), що здійснює зворотно-поступальні рухи, виштовхує порції скла, які відсікаються механічними ножицями. Так утворюється крапля скла заданої ваги.

### **4. Формування виробів на машинах секційного типу**

Сформована крапля по системі лотків, змащених графітом, під дією гравітації спрямовується у конкретну секцію формувальної машини. На ПрАТ «Біомедскло» використовуються високоефективні секційні машини, де кожна секція працює автономно.

Формування відбувається у два етапи за однією з двох основних технологій:

#### **А) Метод «Видування-Видування»:**

**1.Чорнова форма:** Крапля падає у форму, стиснене повітря зверху «осаджує» її для формування горловини (фіксація вінчика).

**2.Продування:** Знизу подається повітря, яке створює внутрішню порожнину - виходить «пулька» (заготовка).

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/ Б/ ОК29-2-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 67 / 14

**3. Чистова форма:** Перекидний механізм переносить розпечену пульку в чистову форму, де остаточним видуванням виріб набуває фінальної геометрії.

**Б) Метод «Пресування-Видування» :** Замість первинного видування використовується металевий плунжер, який фізично видавлює порожнину в краплі. Цей метод забезпечує кращий контроль товщини стінок, що критично важливо для полегшеної тари та медичних флаконів.

### 5. Завершальний етап формування та передача на відпал

Коли форма розкривається, спеціальний механізм-відставник (take-out) переносить виріб на конвеєр. На цьому етапі скло має температуру близько 500–600°C. Поверхня пляшки вже тверда, але всередині зберігаються критичні напруги.

Якщо виріб просто залишити охолоджуватися на повітрі, він лусне через нерівномірне стиснення шарів скла. Тому після формувальної машини вироби негайно спрямовуються в **піч відпалу (леєр)**, де відбувається контрольоване повільне охолодження.

Технологічний ланцюг ПрАТ «Біомедскло» є прикладом замкнутого циклу з високим ступенем автоматизації. Перехід від твердої шихти до рідкої фази та її подальша «заморозка» у формі скляної тари вимагає прецизійного керування термодинамічними параметрами. Оптимізація роботи на кожній ділянці - від точного дозування сировини до стабільної роботи механізмів формувальної машини - дозволяє підприємству виготовляти продукцію, що відповідає суворим фармакопейним стандартам якості.

### Порядок виконання роботи

1. Ознайомитись із основними етапами технологічного процесу виготовлення скляних виробів.
2. Привести структурно-параметричний опис основного технологічного процесу (ТП):
  - а) Назва та порядок виконання технологічних операції (ТО) за основним ТП. Зміст операцій. (Представити у вигляді структурної схеми із зазначенням матеріальних потоків, що сполучають технологічні операції)
  - б) Назва та призначення (принцип дії) основного та допоміжного технологічного обладнання, що використовується при реалізації технологічних операцій, загальні технічні характеристики обладнання.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/ Б/ ОК29-2-2025
	<i>Випуск 1</i>	<i>Зміни 0</i>	<i>Екземпляр № 1</i>	<i>Арк 67 / 15</i>

- с) Основні технологічні параметри, що контролюються при проходженні ТП із прив'язкою до обладнання, що їх забезпечують.
3. Зробити висновки по роботі.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/ Б/ ОК29-2-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 67 / 16

## Лабораторна робота № 7

### Тема: Дослідження технологічного процесу виготовлення трубного прокату (ДП «Євроголд Індестріз Лтд»)

Мета: Ознайомитися з основними етапами і технологічними параметрами процесу виготовлення товарів побутового призначення.

### Теоретичні відомості

Технологічний цикл компанії «Євроголд Індестріз» базуються на принципах вертикальної інтеграції, що дозволяє забезпечувати повний контроль якості на кожному етапі створення товарів побутового призначення, таких як прасувальні дошки, сушарки для білизни та драбини. В основі виробничої філософії підприємства лежить концепція перетворення первинної сировини — листового металопрокату — у високотехнологічний кінцевий продукт із доданою вартістю, що відповідає суворим європейським стандартам безпеки та ергономіки.

Фундамент виробництва починається з етапу підготовки та обробки листового прокату. Сировина, що надходить на підприємство у вигляді великогабаритних рулонів (штрипсів) або листів сталі, проходить вхідний контроль на відповідність хімічного складу та механічних властивостей. Першим критичним етапом є формування штрипси — процес поздовжнього розрізання широкого рулону сталі на вузькі смуги заданої ширини. Точність цього етапу визначає геометричні параметри майбутніх деталей. Використання ліній точного різання мінімізує відхилення та деформації країв, що є критично важливим для наступної стадії — формування труб.

Формування труб на підприємстві здійснюється методом безперервної холодної деформації на спеціалізованих прокатних станах. Штрипса проходить крізь систему валків, які поступово згинають плоский метал, надаючи йому круглої або овальної форми. Теоретична складність цього процесу полягає у дотриманні рівномірності напруження металу, щоб уникнути тріщин або гофрування стінок. Одразу після формування профілю відбувається процес зварювання шва, зазвичай із використанням струмів високої частоти (ТВЧ). Це дозволяє отримати монолітну конструкцію з міцністю шва, що не поступається міцності основного металу. Після зварювання труби проходять калібрування та нарізку на мірні довжини, що стають основою каркасів прасувальних дощок чи ніжок драбин.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/ Б/ ОК29-2-2025
	<i>Випуск 1</i>	<i>Зміни 0</i>	<i>Екземпляр № 1</i>	<i>Арк 67 / 17</i>

Наступний етап — механічна обробка та зварювання вузлів — перетворює окремі заготовки на цілісну конструкцію. Тут застосовуються технології точкового та дугового зварювання в середовищі захисних газів, а також автоматизовані зварювальні роботи. Теоретичний аспект зварювання в «Євроголд Індастріз» орієнтований на створення нероз’ємних з’єднань, здатних витримувати значні статичні та динамічні навантаження під час експлуатації побутових приладів. Важливим елементом є чистота шва та відсутність бризок металу, оскільки це безпосередньо впливає на якість наступного етапу — фарбування.

Процес фарбування є одним із найбільш наукомістких етапів виробництва. Компанія використовує метод електростатичного порошкового напилення з наступною полімеризацією в печі. Перед нанесенням фарби вироби проходять багатоступеневу хімічну підготовку поверхні (знежирення та фосфатування), що забезпечує високу адгезію та корозійну стійкість. В електростатичному полі частинки порошкової фарби рівномірно розподіляються по складних геометричних формах каркасів. Під дією високих температур у печі полімеризації (близько 180-200°C) порошок плавиться, утворюючи міцне, естетичне та зносостійке покриття, яке захищає метал від вологи та механічних пошкоджень у побутових умовах.

Завершальним етапом технологічного ланцюга є фінальне збирання та пакування. На цій стадії до металевих каркасів приєднуються аксесуари: робочі поверхні з металевої сітки, пластикові наконечники, текстильні чохла та механізми регулювання висоти. Логіка пакування базується на забезпеченні цілісності продукту при транспортуванні на великі відстані, оскільки продукція експортується у десятки країн світу. Використання термозбіжної плівки та гофрокартону дозволяє захистити декоративне покриття від подряпин, забезпечуючи при цьому компактність для складської логістики.

Таким чином, виробнича модель «Євроголд Індастріз» являє собою замкнений цикл, де теоретичні знання в галузі металургії, опору матеріалів, електрохімії та промислового дизайну інтегровані в єдиний потік. Це дозволяє підприємству не просто виробляти побутові речі, а створювати надійні інструменти для дому, де кожна технологічна операція — від першого розрізу сталевого листа до фінальної етикетки на коробці — підпорядкована вимогам якості та довговічності. Орієнтація на автоматизацію та екологічність процесів робить цю теоретичну схему виробництва конкурентоспроможною на глобальному ринку.

## Порядок виконання роботи

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/ Б/ ОК29-2-2025
	<i>Випуск 1</i>	<i>Зміни 0</i>	<i>Екземпляр № 1</i>	<i>Арк 67 / 18</i>

1. Ознайомитись із основними етапами технологічного процесу виготовлення товарів побутового призначення.
2. Привести структурно-параметричний опис основного технологічного процесу (ТП):
  - а) Назва та порядок виконання технологічних операції (ТО) за основним ТП. Зміст операцій. (Представити у вигляді структурної схеми із зазначенням матеріальних потоків, що сполучають технологічні операції)
  - б) Назва та призначення (принцип дії) основного та допоміжного технологічного обладнання, що використовується при реалізації технологічних операцій, загальні технічні характеристики обладнання.
  - с) Основні технологічні параметри, що контролюються при проходженні ТП із прив'язкою до обладнання, що їх забезпечують.
3. Зробити висновки по роботі.

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/ Б/ ОК29-2-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 67 / 1

## Лабораторна робота №6

**Тема:** Організація проведення статистичного експерименту та обробка даних

**Мета:** Здобути навички виконання апроксимації експериментальних даних та організації проведення експерименту над технологічним обладнанням

### Теоретичні відомості

Задача апроксимації полягає у спрощенні даних, які характеризують визначений технологічний процес (ТП) загальні характеристики та закони якого відомі. Основними причинами невідповідності даних конкретному процесу є умови проведення експерименту, неточності вимірювання, складні взаємні та часові залежності параметрів вимірювання та обробки даних. Тому на практиці часто вдаються до обробки чи фільтрації даних, що мають певні закономірності, визначаючи головні їх параметри.

Вирішимо задачу апроксимації експериментальних даних, отриманих у часовій послідовності, передбачаючи що загальна залежність має бути лінійною, описуватись

функцією першого порядку загального виду  $y=c_1x+c_0$ , де  $y$  - це апроксимований параметр спостереженого процесу,  $x$  - час, в який параметр був зафіксований. Для вирішення цієї задачі застосуємо метод найменших квадратів, побудуємо графіки результату апроксимації та вихідних експериментальних даних, оцінимо середньоквадратичну похибку апроксимації.

Розглянемо приклад апроксимації експериментальної послідовності процесу гальванічного міднення в умовних одиницях системи вимірювання датчика оцінки якості гальванізації.

$$x_1 := ( 0.5 \ 0.65 \ 0.8 \ 0.94 \ 1.1 \ 1.25 \ 1.4 \ 1.55 \ 1.7 \ 1.85 )$$

$$y_1 := ( 4.843 \ 3.776 \ 2.951 \ 2.234 \ 1.648 \ 1.185 \ 0.655 \ 0.324 \ -0.041 \ -0.38 )$$

Розрахуємо параметри  $c_0$ ,  $c_1$  обраної функції методом найменших квадратів:

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/ Б/ ОК29-2-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 67 / 2

$$Q = \sum_{i=0}^{n-1} \left[ (y1^T)_i - \left[ c0 + c1 \cdot (x1^T)_i \right] \right]^2 = \min$$

Зазначимо умови екстремуму даного функціоналу за параметрами  $c0$ ,  $c1$ :

$$\frac{dQ}{dc0} = 2 \cdot \sum_{i=0}^{n-1} \left[ (y1^T)_i - \left[ c0 + c1 \cdot (x1^T)_i \right] \right] \cdot 1 = 0$$

$$\frac{dQ}{dc1} = 2 \cdot \sum_{i=0}^{n-1} \left[ (y1^T)_i - \left[ c0 + c1 \cdot (x1^T)_i \right] \right] \cdot (x1^T)_i = 0$$

За наведеними умовами складемо систему лінійних алгебраїчних рівнянь:

$$c0 \cdot n + c1 \cdot \sum_{i=0}^{n-1} (x1^T)_i = \sum_{i=0}^{n-1} (y1^T)_i$$

$$c0 \cdot \sum_{i=0}^{n-1} (x1^T)_i + c1 \cdot \sum_{i=0}^{n-1} [(x1^T)_i^2] = \sum_{i=0}^{n-1} (x1^T)_i \cdot (y1^T)_i$$

Використаємо метод Крамера для розв'язку системи алгебраїчних рівнянь відносно невідомих  $c0$ ,  $c1$ :

$$S := \begin{bmatrix} n & \sum_{i=0}^{n-1} (x1^T)_i \\ \sum_{i=0}^{n-1} (x1^T)_i & \sum_{i=0}^{n-1} [(x1^T)_i^2] \end{bmatrix} \quad G := \begin{bmatrix} \sum_{i=0}^{n-1} (y1^T)_i \\ \sum_{i=0}^{n-1} (x1^T)_i \cdot (y1^T)_i \end{bmatrix}$$

$$S = \begin{pmatrix} 10 & 11.74 \\ 11.74 & 15.644 \end{pmatrix} \quad G = \begin{pmatrix} 17.195 \\ 13.277 \end{pmatrix}$$

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/ Б/ ОК29-2-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 67 / 3

$$\Delta := \begin{pmatrix} 10 & 11.74 \\ 11.74 & 15.644 \end{pmatrix} \quad |\Delta| = 18.612$$

$$\Delta_1 := \begin{pmatrix} 17.195 & 11.74 \\ 13.277 & 15.644 \end{pmatrix} \quad |\Delta_1| = 113.127$$

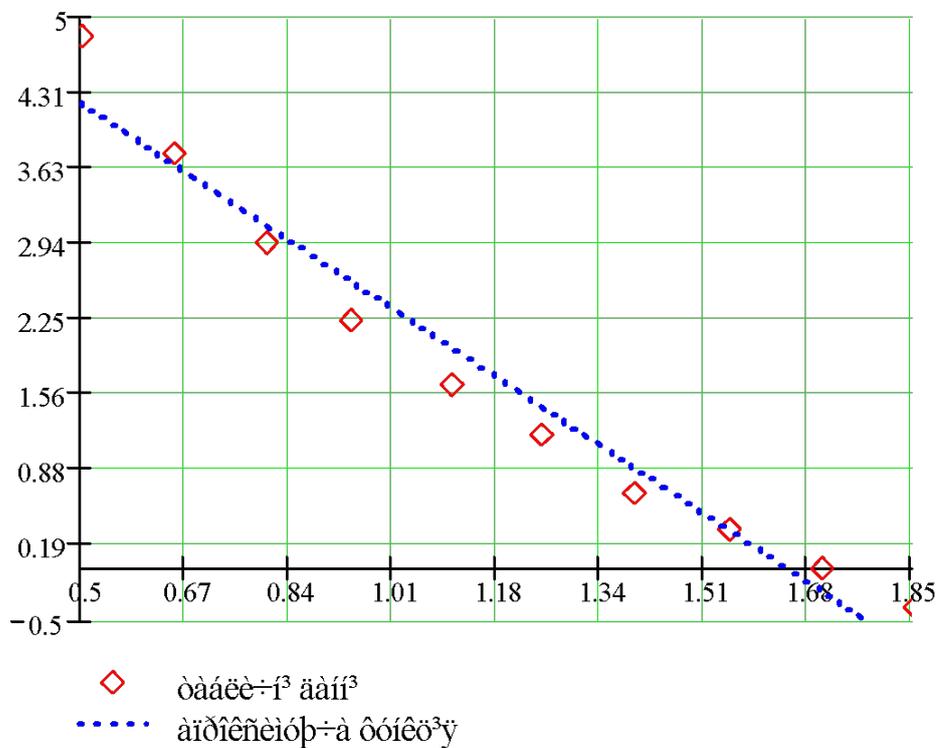
$$\Delta_2 := \begin{pmatrix} 10 & 17.195 \\ 11.74 & 13.277 \end{pmatrix} \quad |\Delta_2| = -69.099$$

$$c_0 = 6.079 = \Delta_1 / \Delta$$

$$c_1 = -3.713 = \Delta_2 / \Delta$$

Апроксимуюча лінійна функція має вигляд:

$$y(x) := c_1 \cdot x + c_0$$



Середньоквадратична похибка становить:

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/ Б/ ОК29-2-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 67 / 4

$$\sigma := \frac{\sum_{i=0}^{n-1} \sqrt{\left[ y \left[ (x1^T)_i \right] - (y1^T)_i \right]^2}}{n}$$

$$\sigma = 0.267$$

Після того, як визначені фактичні параметри процесу, що спостерігається, необхідно встановити зв'язки між ними із використанням моделей, які дозволяють визначити інтенсивність та спрямованість процесів як основи налаштування для досягнення кращих показників роботи технологічного комплексу.

Процес отримання моделі роботи технологічного об'єкту управління реалізуємо шляхом планування повного факторного експерименту типу  $2^k$

Повний факторний експеримент, це експеримент при проведенні якого визначається значення параметру керування при повному переборі вхідних факторів. Експеримент типу  $2^k$  передбачає два рівня варіювання вхідних факторів. ТО являє собою «чорну скриню»

Виконаємо планування експерименту процесу гальванічного міднення електричного дроту. Метою є визначити якість міднення (товщину шару міді на одиницю поверхні дроту) у гальванічній ванні від 3-х факторів: Сили струму I, температури електролітичного розчину T та загальної площі поверхонь електродів:

6. Закодуємо фактори в діапазоні номінальної роботи технологічного об'єкту.

Інтервал варіювання та рівень факторів	Сила струму, А	Температура розчину, С	Площа електродів, S
Нижній рівень $y_i = -1$	8	30	1.2
Верхній рівень $y_i = +1$	14	60	2
Нульовий рівень $y_i = 0$	11	45	1.6
Інтервал варіювання $\sigma_i$	3	15	0.4
Кодове позначення	$x_1$	$x_2$	$x_3$

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/ Б/ ОК29-2-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 67 / 5

7. Складаємо план-матрицю експерименту, як повний перебір факторів та проводячи багатократне його проведення формуємо матрицю результатів дослідів

Дослід	x <sub>1</sub>	x <sub>2</sub>	x <sub>3</sub>	x <sub>12</sub>	x <sub>13</sub>	x <sub>23</sub>	x <sub>123</sub>	y <sub>1</sub>	y <sub>2</sub>	y <sub>ср</sub>
1	-	-	-	+	+	+	-	18	19	18.5
2	+	-	-	-	-	+	+	31	32	31.5
3	-	+	-	-	+	-	+	25	23	24
4	+	+	-	+	-	-	-	35	34	34.5
5	-	-	+	+	-	-	+	20	22	21
6	+	-	+	-	+	-	-	32	31	31.5
7	-	+	+	-	-	+	-	27	27	27
8	+	+	+	+	+	+	+	38	37	37.5

$$y_{ср} = (y_1 - y_2)/2$$

8. Виконуємо перевірку відтворюваності дослідів за критерієм Кохонена

$$G = \frac{s_u^2 \text{ макс}}{\sum_{u=1}^n s_u^2} \leq G_{(0,05; f_n; f_u)},$$

Де  $s_u^2 = \frac{\sum_{p=1}^m (y_{u,p} - \bar{y}_u)^2}{m-1}$  - дисперсія результатів дослідів на u-м сполученні факторів, m – кількість паралельних дослідів, G (--) – табличне значення критерію Кохрена  $G(0.05, 8, 1) = 0.68$ , де  $f_n$  - кількість незалежних оцінок дисперсії,  $f_u$  – кількість ступенів свободи кожної оцінки = m-1.

Значення оцінок дисперсії у кожній точці плану для двох паралельних дослідів визначається, як:  $s_u^2 = \frac{\Delta^2}{2}$

$$S_1^2 = (18-19)^2 / 2 = 0.5$$

$$S_2^2 = (31-32)^2 / 2 = 0.5$$

$$S_3^2 = (25-23)^2 / 2 = 2$$

$$S_4^2 = (35-34)^2 / 2 = 0.5$$

$$S_5^2 = (20-22)^2 / 2 = 2$$

$$S_6^2 = (32-31)^2 / 2 = 0.5$$

$$S_7^2 = (27-27)^2 / 2 = 0$$

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/ Б/ ОК29-2-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 67 / 6

$$S_8^2 = (38-37)^2 / 2 = 0.5$$

$$\text{Тоді } G = 2 / (0.5+0.5+2+0.5+2+0.5+0+0.5) = 0.37 < G(0.05, 8, 1)$$

Отже процес відтворюваний

Коефіцієнти регресії Лінійного рівняння складуть:

$$b_0 = \frac{\sum_{u=1}^n \bar{y}_u}{n}; \quad b_i = \frac{\sum_{u=1}^n x_{iu} \bar{y}_u}{n} \quad b_{ij} = \frac{\sum_{u=1}^n x_{iu} x_{ju} \bar{y}_u}{n}$$

$$b_0 = 18.5+31.5+24+34.5+21+31.5+27+37.5 = 225.5/8 = 28.2$$

$$b_1 = -18.5+31.5-24+34.5-21+31.5-27+37.5 = 44.5/8 = 5.6$$

$$b_2 = -18.5-31.5+24+34.5-21-31.5+27+37.5 = 20.5/8 = 2.6$$

$$b_3 = -18.5-31.5-24-34.5+21+31.5+27+37.5 = 8.5/8 = 1.1$$

$$b_{12} = 18.5-31.5-24+34.5+21-31.5-27+37.5 = -2.5/8 = -0.3$$

$$b_{13} = 18.5-31.5+24-34.5-21+31.5-27+37.5 = -2.5/8 = -0.3$$

$$b_{23} = 18.5+31.5-24-34.5-21-31.5+27+37.5 = 3.5/8 = 0.4$$

$$b_{123} = -18.5+31.5+24-34.5+21-31.5-27+37.5 = 2.5/8 = 0.3$$

Виконаємо перевірку адекватності моделі за критерієм Фішера:

$$F = \frac{s_{ад}^2}{s_y^2} \leq F_{(0,05; f_{ад}; f_y)} \quad s_{ад}^2 = \frac{\sum_{u=1}^n (\bar{y}_u - y_u)^2}{n - k - 1}$$

$y_u$  – розраховане значення реакції в  $u$ -му досліді,  $f_{ад} = n-k-1$  – число ступенів свободи дисперсії адекватності  $f_y$  – число ступенів свободи дисперсії відтворюваності.

$$s_y^2 = \frac{\sum_{u=1}^n s_u^2}{n} \text{ – похибка досліду}$$

$$s_y^2 = 6.5/8 = 0.81$$

Повне рівняння моделі ТО становить

$$Y = 28.2 + 5.6x_1 + 2.6x_2 + 1.1x_3 - 0.3x_{12} - 0.3x_{13} + 0.4x_{23} + 0.3x_{123}$$

Перевіримо адекватність моделі без врахування взаємодії факторів:

$$Y = 28.2 + 5.6x_1 + 2.6x_2 + 1.1x_3$$

Дослід	$y_u$	$y_{u \text{ ср}}$	$(y_{u \text{ ср}} - y_u)^2$
--------	-------	--------------------	------------------------------

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019			Ф-20.10- 05.01/141.00.1/ Б/ ОК29-2-2025
	Випуск 1	Зміни 0	Екземпляр № 1	Арк 67 / 7

1	18.9	18.5	0.16
2	30.1	31.5	1.96
3	24.1	24	0.01
4	35.3	34.5	0.64
5	21.1	21	0.01
6	32.3	31.5	0.64
7	26.3	27	0.49
8	37.5	37.5	0

Критерій Фішера при  $s_{ад}^2 = 3.91/(8-3-1) = 0.97$

$F = 0.97/0.81 = 1.19 < F(0.05, 0.97, 8) = 5.31$  – отримана модель адекватна

Оцінимо значущість коефіцієнтів регресії

Коефіцієнт буде вважатися значущим, якщо

$$|b_i| \geq \Delta b_i = t_{(0,05; f_y)} \frac{s_y}{\sqrt{n}} = 2.31(0.81)^{-1/2}/(8)^{-1/2} = 2.6$$

Отже, впливом фактору  $x_3$  можна також знехтувати.

### Порядок виконання роботи

2. Ознайомитись із теоретичними положеннями виконання задачі апроксимації та побудови факторного експерименту процесу гальванічного міднення.
3. Виконати апроксимацію заданої експериментальної послідовності процесу гальванічного міднення в умовних одиницях системи вимірювання датчика.
4. Виконаємо планування експерименту процесу гальванічного міднення електричного дроту. Оцінити відтворюваність та адекватність отриманої моделі.
5. Зробити висновки по роботі.

Дані до виконання за варіантами:

До задачі апроксимації вхідних даних

№	X	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	Y1	-0,33	-2,97	-5,02	-6,93	-8,7	-10,16	-12,02	-14,7	-16,48	-18,28
2	Y2	-2,13	-1,28	0,04	1,31	2,05	2,39	3,74	4,2	5,71	6,05

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019									Ф-20.10- 05.01/141.00.1/ Б/ ОК29-2-2025	
	Випуск 1			Зміни 0			Екземпляр № 1			Арк 67 / 8	

3	Y3	1,65	1,72	2,85	3,52	4,05	4,71	4,56	6,06	5,76	7,11
4	Y4	-0,23	-1,91	-3,91	-5,9	-7,82	-9,86	-12,41	-13,6	-16,19	-17,53
5	Y5	5,7	6,14	7,66	8,82	10,24	10,97	12,1	12,91	13,86	15,4
6	Y6	-0,07	-0,5	-0,08	-0,43	-0,45	-0,12	-0,86	-0,2	-0,62	-0,19
7	Y7	-1,5	-2,12	-2,2	-2,57	-2,61	-2,76	-3,05	-3,18	-2,71	-3,39
8	Y8	3,19	5,33	7,13	8,05	10,49	11,51	12,83	14,47	16,25	18,67
9	Y9	-6,06	-8,15	-9,88	-11,01	-12,97	-14,38	-16,77	-18,13	-20,44	-21,96
10	Y10	-0,21	-1,7	-3,95	-6,14	-8,15	-10,99	-12,89	-15,34	-17,77	-20,06
11	Y11	5,66	8,27	9,97	13,02	14,68	16,93	19,75	21,7	24,46	26,05
12	Y12	-2,61	-3,66	-3,93	-4,98	-5,84	-6,22	-7,21	-7,57	-9,07	-9,34
13	Y13	-0,78	1,22	3,2	5,72	7,62	10,66	12,75	14,59	17	18,76
14	Y14	1,75	1,93	2,93	3,94	3,89	4,92	4,95	6,51	6,99	7,71
15	Y15	-0,78	-3,14	-4,48	-6,46	-8,8	-11,11	-12,86	-14,42	-16,27	-18,89
16	Y16	-1,86	-3,1	-3,65	-5,22	-6,73	-7,74	-8,42	-9,87	-11,24	-11,57
17	Y17	-6,96	-8,83	-10,87	-13,72	-16,35	-18,31	-21,09	-23,84	-25,89	-28,49
18	Y18	-0,3	1,4	3,8	4,98	7,58	9,48	11,08	13,36	15,12	18,03
19	Y19	0,76	-1,58	-3,04	-5,09	-6,94	-9,25	-11,43	-13,23	-14,87	-16,39
20	Y20	-2,79	-2,78	-1,8	-2,6	-1,61	-1,93	-1,99	-0,98	-1,2	-1,01
21	Y21	3,07	2,44	1,58	0,18	0,07	-1,46	-1,79	-3,27	-3,51	-4,64
22	Y22	5,14	5,79	6,02	5,8	6,62	6,71	6,87	7,13	7,34	7,75
23	Y23	4,35	3,73	4,12	3,78	3,84	3,52	3,49	4,3	3,48	3,5
24	Y24	3,95	4,74	5,37	7,18	8,07	8,38	9,88	10,33	11,29	12,59
25	Y25	1,11	2,85	4,3	5,1	6,44	7,78	9,38	10,3	12,16	13,65
26	Y26	-1,11	-1,55	-3,01	-3,34	-4,06	-4,75	-5,13	-5,95	-6,63	-7,75
27	Y27	1,35	0,9	-0,35	-0,07	-1,31	-1,78	-2,66	-3,15	-3,73	-4
28	Y28	2,32	2	1,84	1,66	1,21	0,44	-0,34	-0,54	-0,9	-1,02
29	Y29	6,5	9,21	11,35	12,86	14,71	17,07	19,43	21,36	23,75	25,2
30	Y30	2,43	1,03	-0,72	-2,65	-4,41	-5,53	-7,76	-9,35	-11,07	-12,7
31	Y31	-2,54	-4,18	-5,94	-8,41	-9,89	-12,77	-14,25	-16,35	-18,44	-20,73
32	Y32	-1,78	0,01	2,16	4,74	7,04	9,09	11,11	14,07	15,8	17,74
33	Y33	-2,48	-4,34	-6,47	-8,6	-11,18	-13,3	-15,51	-17,81	-19,72	-22,31
34	Y34	-5,02	-7,25	-8,95	-10,98	-13,56	-15,74	-17,58	-19,32	-21,78	-23,39
35	Y35	-3,29	-5,43	-7,05	-9,02	-10,85	-12,67	-14,42	-15,47	-17,26	-19,08
36	Y36	-5,34	-5,68	-5,89	-6,04	-6,32	-6,49	-7,02	-7,78	-7,98	-8,54
37	Y37	0,68	2,96	6,04	7,94	10,45	12,93	15,06	17,56	19,66	22,23
38	Y38	-1,71	0,15	2,66	5,38	7,78	10,05	12,78	15,34	17,24	19,89
39	Y39	-1,98	-3,19	-3,82	-4,79	-6,07	-7,02	-8,2	-9,12	-10,41	-11,77
40	Y40	-6,33	-8,09	-9,46	-11,61	-12,63	-15,23	-16,87	-18,41	-19,96	-21,65
41	Y41	-2,44	-2,38	-3,11	-2,79	-3,4	-3,89	-3,52	-4,3	-4,52	-5,22
42	Y42	2,29	4,4	6,92	8,47	11,04	13,68	15,78	18,32	19,83	22,68



Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019																Ф-20.10- 05.01/141.00.1/ Б/ ОК29-2-2025	
	Випуск 1					Зміни 0					Екземпляр № 1					Арк 67 / 10		

3	24	22	25	21	24	22	24	21	24	23	26	22	25	23	23	22	26	23	25	21
4	35	33	35	35	35	32	34	34	34	34	35	32	35	34	34	33	34	34	34	35
5	21	22	19	20	20	23	19	21	19	21	19	21	19	22	20	20	20	20	18	21
6	31	30	32	29	31	29	31	30	31	30	31	31	32	30	31	30	31	30	32	30
7	25	26	26	26	27	25	27	26	26	27	27	26	27	28	26	26	26	26	27	26
8	38	35	38	37	36	38	37	37	39	36	36	38	38	37	37	36	38	35	38	38

№	21		22		23		24		25		26		27		28		29		30	
До слі ди	y1	y2																		
1	17	18	17	19	17	19	19	18	18	19	17	19	17	19	17	18	18	19	19	20
2	31	31	31	31	30	30	31	31	32	30	29	30	30	31	31	30	32	32	31	31
3	25	24	24	21	26	23	26	22	25	23	23	23	25	23	24	23	23	23	24	23
4	34	34	34	33	33	32	33	34	33	34	34	35	34	35	35	33	34	35	36	34
5	18	20	20	22	21	21	19	21	20	23	20	22	18	22	20	21	20	21	20	22
6	32	30	32	30	32	30	30	30	32	31	32	31	32	31	31	31	33	31	31	32
7	28	26	25	27	26	26	28	27	26	27	28	27	26	26	27	26	26	25	26	28
8	39	36	37	36	37	38	39	37	38	38	39	38	37	35	39	36	38	36	37	38

№	31		32		33		34		35		36		37		38		39		40	
До слі ди	y1	y2																		
1	16	19	17	19	17	17	17	17	19	20	16	17	16	20	17	19	16	18	18	18
2	31	32	29	32	30	31	32	32	31	31	30	33	29	33	31	32	29	31	31	32
3	25	23	23	21	24	21	23	22	24	22	24	24	26	24	26	22	24	24	26	22
4	34	32	33	34	34	35	35	34	34	34	36	34	35	35	34	34	35	34	34	34
5	20	22	19	23	21	21	18	21	19	22	21	21	19	22	20	21	21	21	20	22
6	30	31	33	29	31	32	30	31	33	31	33	31	32	30	32	30	31	31	32	32
7	25	27	26	28	25	25	26	26	28	26	26	26	26	26	28	27	26	28	27	28
8	37	36	39	38	37	37	39	38	37	37	36	36	38	37	36	37	37	36	39	37

№	41		42		43		44		45		46		47		48		49		50	
До слі ди	y1	y2																		
1	18	19	17	20	17	17	18	18	16	17	17	17	16	17	16	18	17	17	16	19

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019																	Ф-20.10- 05.01/141.00.1/ Б/ ОК29-2-2025	
	Випуск 1					Зміни 0					Екземпляр № 1					Арк 67 / 11			

2	29	33	30	30	32	32	31	30	30	31	30	32	31	31	31	30	30	33	32	31
3	25	22	25	21	23	22	25	23	23	21	25	23	25	22	26	23	24	22	26	24
4	35	34	36	34	34	35	34	34	34	33	34	33	36	32	35	34	34	35	33	35
5	19	21	20	22	19	22	21	20	19	20	20	21	20	21	21	20	20	23	20	21
6	31	30	30	29	32	31	31	30	31	30	31	30	30	32	30	31	31	32	31	30
7	27	25	25	26	27	26	27	27	26	25	27	27	28	28	28	27	25	28	28	27
8	37	38	38	35	36	35	38	36	39	37	39	35	37	37	39	37	39	35	37	37
№	51		52		53		54		55		56		57		58		59		60	
До слі ди	y1	y2																		
1	19	19	17	19	16	19	19	18	18	18	18	19	17	18	18	19	17	19	17	19
2	30	32	30	30	29	33	31	32	31	31	31	33	30	32	31	32	30	31	29	32
3	25	23	24	23	24	21	25	22	24	24	23	23	24	21	25	21	24	21	24	22
4	35	33	34	32	34	35	34	32	34	34	36	34	35	34	36	33	34	35	34	34
5	20	21	19	22	19	22	18	21	19	22	20	21	20	22	20	23	20	23	19	22
6	31	30	30	29	31	29	32	31	32	31	32	30	32	30	31	30	32	32	32	31
7	27	28	25	26	27	27	25	26	26	28	25	27	28	26	28	26	26	25	25	26
8	37	37	38	38	39	36	36	36	37	35	38	37	38	37	38	37	38	36	39	37