

Міністерство освіти і науки України  
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії

(повна назва факультету)

Кафедра електричної інженерії

(повна назва кафедри)

# КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

бакалавр

(назва освітнього ступеня)

на тему: **РОБОТА ПАРОГЕНЕРАТОРНОЇ УСТАНОВКИ ТЕС НА  
БІОПАЛИВІ (СОЛОМІ)**

Виконав студент IV курсу, групи ЕТ-41

спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та

електромеханіка

(шифр і назва спеціальності)

Чернецький Т.Б.  
(прізвище та ініціали)

(підпис)

Керівник

(підпис)

Коваль В.П.

(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль

(підпис)

Мовчан Л.Т.

(прізвище та ініціали)

Завідувач кафедри

(підпис)

Тарасенко М.Г.

(прізвище та ініціали)

Рецензент

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Тернопіль  
2023

## РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота бакалавра. Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя. Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії. Кафедра електричної інженерії, група ЕТс–41. - Т. : ТНТУ, 2023.

Стор. 53; рис. 42; табл. 2; креслень (презентацій) —; джерел 7.

Кваліфікаційна робота бакалавра виконана на підставі завдання на тему: «Робота парогенераторної установки ТЕС на біопаливі (соломі)».

Метою роботи є обґрунтування параметрів парогенераторної установки, що працює на пожнивних залишках (соломі), для комбінованого одержання тепла та електроенергії.

У роботі проведено аналіз пароенергетичних установок на соломі на світовому ринку та в Україні. А також проведено аналіз енергетичних показників соломи як палива. Встановити параметри парогенераторної установки, яка може працювати на такому паливі як солома. Обчислено характеристики парогенераторної установки

*Ключові слова: ПАЛИВО СОЛОМА, ПАРОГЕНЕРАТОРНА УСТАНОВКА, ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЯ*

## ЗМІСТ

### ВСТУП

1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ.....	8
1.1 Сучасний стан технологій і технічних засобів децентралізованого енергопостачання сільськогосподарських об'єктів .....	8
1.2 Солома та пожнивні рештки як джерело енергії .....	8
1.3 Енергетичні властивості пожнивних решток злакових культур.....	10
1.4 Збирання, зберігання та переміщення соломи .....	13
1.5 Висновки до розділу .....	14
2 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ.....	16
2.1 Способи вироблення тепла та електроенергії з пожнивних залишків злакових культур .....	16
2.2 Станції комбінованого вироблення тепла та електроенергії.....	21
2.3 Висновки до розділу .....	25
3 РОЗРАХУНКОВИЙ РОЗДІЛ .....	27
3.1 Визначення потужності парового котла .....	27
3.2 Форми та робочої площі лопатки активної турбіни паросилової установки.....	27
3.3 Вибір натурного зразка парового котла.....	34
3.4 Визначення паропродуктивності та тиску пари в котлі імітаційної установки для електропостачання.....	38
3.5 Визначення параметрів турбогенератора паросилової установки для електропостачання.....	41
3.6 Висновки до розділу .....	45
4 БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ .....	46
4.1 Блискавкозахист .....	46

4.2 Особливості електротравматизму, електричний струм як чинник небезпеки .....	49
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ .....	52
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ .....	53

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Сучасні загальносвітові тенденції розвитку джерел енергії спрямовані в галузь альтернативних технологій, наприклад, використання біомаси. Потенційно важливим для сільськогосподарських регіонів видом біомаси є солома зернових культур. Елементний склад соломи і теплота її згоряння не надто відрізняються від відповідних показників для деревини, хоча теплота згоряння соломи нижча, ніж у сухої деревини. З іншого боку, з урахуванням звичайної для соломи вологості, нижчої за 20 %, теплота згоряння соломи виявляється вищою, ніж у деревної тріски, яку наразі починають широко використовувати у країнах Північної Європи.

Вміст енергії в 1 кг дизельного палива і в 2,4 кг соломи однаковий. Один рулон вагою 330 кг замінює щонайменше 140 кілограмів дизельного палива або 140 м<sup>3</sup> природного газу.

Якщо заготівля дров - це досить трудомісткий і дороговартісний процес, то для збирання оброблених культур розроблено спеціальні технології. Одним із кінцевих продуктів збирання є рулони соломи, які можна легко механізовано транспортувати та зберігати навіть просто неба.

Солома зернових у сільському господарстві, як правило, завжди в надмірній кількості. Придатна солома будь-яких зернових культур.

Пшенична солома вирізняється особливо рівномірним згорянням, але від неї майже не відстають жито, ячмінь і овес. Вміст енергії практично визначається тільки масою сухої речовини. Сильно спресовані, важкі, жорсткі рулони, що добре зберігають форму, найкраще придатні для зберігання і спалювання.

Пожнивні залишки розглядаються як пальне. "Енергетичний заряд" виникає через вміст, наприклад, у соломі зерна, яке запресовується разом із соломною в рулон. Слід враховувати, що в такій біомасі у складі білка міститься більше азоту, який потім у вигляді монооксиду азоту входить до складу вихлопу.

**Мета кваліфікаційної роботи:** обґрунтування параметрів парогенераторної установки, що працює на пожнивних залишках (соломі), для комбінованого одержання тепла та електроенергії.

Відповідно до даної метою ставляться такі **завдання**:

1. Провести аналіз пароенергетичних установок на соломі на світовому ринку та в Україні.
2. Провести аналіз енергетичних показників соломи як палива.
3. Встановити параметри парогенераторної установки, яка може працювати на такому паливі як солома.
4. Встановити характеристики парогенераторної установки.
5. Описати питання з безпеки життєдіяльності та основи охорони праці.

**Структура роботи.** Робота складається з розрахунково-пояснювальної записки та графічної частини. Розрахунково-пояснювальна записка складається з вступу, 4 частин, висновків та переліку посилань. Обсяг роботи: розрахунково-пояснювальна записка – 53 арк. формату А4, графічна частина – \_\_\_\_ аркушів презентації.

## **1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ**

### **1.1 Сучасний стан технологій і технічних засобів децентралізованого енергопостачання сільськогосподарських об'єктів**

У цьому аспекті слід розглядати два ефективні шляхи використання незернової частини врожаю злакових культур. Перший - це виробництво паливних брикетів або пелет, що для агропромислових підприємств дасть змогу зняти відповідальність за спалювання відходів на полях, забезпечить появу нових робочих місць і додатковий дохід. А для бізнесу цей напрямок означає вихід на європейські ринки з біопаливом із місцевих відходів. Так, вартість оптових закупівель брикетів із соломи на пункті доставки Ягодин (на кордоні з Польщею) доходить до 100 євро/тонна за собівартості виробництва в 50-55 євро/тонна. Другий - використання рулонів або тюків соломи як палива для тепло- та електрогенерації, різних виробничих, сільськогосподарських і побутових об'єктів.

Необхідно дослідити технологічні питання, пов'язані з безпосереднім перетворенням поживних залишків на теплоту та електроенергію, а також високоефективні сучасні технічні засоби, які використовуються для цих цілей.

### **1.2 Солома та поживні рештки як джерело енергії**

Як відомо, основна частина електроенергії виробляється за рахунок спалювання викопної сировини [1]. Отримане при цьому тепло використовується, наприклад, для утворення пари, яка обертає турбіну, приєднану до генератора. Таким чином, головним методом отримання електроенергії є непряме перетворення тепла, пов'язане з досить істотними енергетичними втратами. Однак, запас викопного палива не нескінченний, тому особлива увага сьогодні приділяється поновлюваним джерелам енергії - використанню біомаси як джерела теплової енергії.

Основними технологіями термохімічної переробки біомаси (БМ) є пряме спалювання (найбільш вивчене та комерційно розвинене), газифікація (наявні демонстраційні установки, що працюють) і піроліз (наявні установки різної потужності, що працюють). Огляди технологій газифікації та піролізу БМ подано в роботах. Нині світовим лідером у використанні соломи в енергетичних цілях є Данія. У таблиці 1.1 наведено дані про кількість у цій країні соломоспалювальних установок і станцій. З метою отримання енергії солону використовують Австрія (кілька фермерських установок, 5 теплових станцій) і Швеція (близько 80 фермерських установок і 5 теплових станцій, що застосовують солону як додаткову сировину), Україна використовує близько 60 фермерських установок і 2 теплові станції. У Фінляндії та Франції знаходяться по одній тепловій станції та кілька фермерських котлів, що використовують солону, потужністю менше 1 МВт.

Таблиця 1.1 - Використання біомаси соломи для отримання енергії в Данії на 2017 р.

Установки та станції	Число установок (станцій)	Річне споживання соломи	
		тис.т	ГДж
Фермерські установки (0,1... 1,0 МВт)	8300	420	6,6
Теплові станції (1... 10 МВт)	71	350	4,7
Станції КТЕ	17	400	7
Всього		1170	18,3

Найголовнішим плюсом соломи як палива є те, що під час швидкого горіння вона виділяє стільки ж CO<sub>2</sub>, як і під час природного розпаду.

Солома містить хлор, сполуки якого викликають корозію теплообмінного обладнання. Причому, в "жовтій" (свіжозібраній) соломі майже в 4 рази вище, ніж у "сірій" (зів'ялій). Вважається, що для вимивання хлоридів із соломи



достатньо 5-7 днів.

У європейських країнах використання соломи - це високоприбутковий і шанований у суспільстві бізнес, що вирішує завдання екології, сільського господарства, будівництва та енергетики.

Солома - це гаряче повітря, гаряча вода, пара, електроенергія.

Економічна вигода очевидна у зв'язку з використанням дешевої сировини. Собівартість тонни соломи в полі близько 10 €.

### **1.3 Енергетичні властивості пожнивних решток злакових культур**

Біомасу пожнивних залишків злакових культур складно використовувати для безпосереднього спалювання і на деяких етапах збирання, а також транспортування і зберігання. Це впливає з неоднорідності соломи, а також низькою температурою плавлення золи і більшим вмістом хлору. Обсяги соломи і вугілля, рівні за енергомістом, різняться, приблизно, в 10-20 разів. Головною ж проблемою під час використання соломи як палива є її низька густина в насипаному вигляді (30-40 кг/м), що здорожчує транспортування соломи і її зберігання, а також ускладнює процес подачі соломи в камеру згорання котла. Але всі ці проблеми легко вирішити, якщо в процесі збирання злакових культур соломі відразу формувати в тюки спеціальними прес-підбирачами, які можуть виробляти тюки соломи зі щільністю понад 105 кг/м [2]. Зарубіжні виробники випускають такі апарати зі щільністю пресування соломи близько 300 кг/м . Тюки можна складувати на полях на необмежений час, у великій кількості, обернувши їх вологозахисним матеріалом.

У табл. 1.2 наведено типові характеристики соломи порівняно з характеристиками вугілля та природного газу [2], а в таблиці 1.3 - зольність і теплота згорання соломи різних зернових культур.

Таблиця 1.2 - Порівняльні фізико-хімічні властивості вуглеводневої сировини

Характеристика	Жовта солома	Сіра солома	Вугілля	Природний газ
Вологість, % мас.	15	15	12	0,0
Склад пального, % мас.:				
зола,	4	3	12	0,0
вуглець,	42	43	59	75
кисень,	37	38	7,3	0,9
водень,	5,0	5,2	3,5	24
хлор,	0,75	0,2	0,08	-
азот,	0,35	0,41	1,0	0,9
сірка,	0,16	0,13	0,8	0,0
леткі компоненти	70	73	25	100
Теплота згорання, МДж/кг:				
фактична,	14,4	15	25	48
сухої сировини без попелу	18,2	18,7	32	48
Температура попелу, °С:				
початку деформації,	950	1100	1175	-
розм'якшення,	1050	1150	1225	-
рідкопаливного стану,	1150	1250	1275	-

Примітка. У процесі в'янення колір соломи змінюється від жовтого до сіруватого. Терміни "жовта солома" або "сіра" вказують на ступінь в'янення і на якість соломи.

Так само під час спалювання соломи близько 70 % її компонентів потрапляють в атмосферу, що створює необхідність у спеціальних конструкціях топки котла і рециркуляції повітря, що надходить в область горіння.

Висока концентрація хлору, що міститься в соломі ячменю, вівса та

ріпаку, призводить до корозії деяких елементів котла. У договорах між постачальниками і споживачами, які використовують соломку як сировину, зазвичай серед інших обумовлюються дві основні характеристики: вологість соломи і ступінь її в'янення.

Таблиця 1.3 - Зольність і теплота згоряння соломи різних зернових культур

Зернова культура	Зольність на суху масу, %	Нижча теплота згоряння на суху масу, МДж/кг	Нижча теплота згоряння робочої маси за вологості 20 %, МДж/кг
Жито	4,5	17,0	13,6
Пшениця	6,5	17,8	13,8
Ячмінь	4,5 - 5,9	17,4	13,4
Овес	4,9	16,7	12,9
Солома в середньому	5,0	17,4	13,5

Діапазон вологості, допустимий для використання соломи на теплових станціях, становить 10-25 %. Оптимальне значення вологості - 15 %. При збільшенні цього значення ціна на закупівлю соломи знижується. На різних теплових станціях значення вологості соломи не збігаються, але зазвичай вони знаходяться в межах від 18 до 22 % [3]. Параметр в'янення показує - як довго солома була на полі після збору врожаю і яка кількість опадів випадала за цей період. Чим вищий ступінь в'янення, тим вища ймовірність зниження рівня концентрації лужних металів і сполуки хлору в соломі внаслідок їхнього вимивання.

### 1.4 Збирання, зберігання та переміщення соломи

Пожнивні рештки злакових культур заготовляють у вигляді брикетів, тюків, що мають у перерізі прямокутну або циліндричну форми. Під час збирання врожаю комбайн за собою залишає смугу соломи. За ним слідує трактор, оснащений прес-підбирачем. Параметри рулонних прес-підбирачів, що застосовуються в нашій країні, наведено в таблиці 1.4.

Таблиця 1.4 - Технічні характеристики рулонних прес-підбирачів

Тип підбирача та технічні характеристики	ПВР-400А	ПРФ-750	ПР-Ф-145	Pelikan
Щільність пресування при вологості 22-28%, кг/м <sup>3</sup>	70	80	126	150
Діаметр рулона, м	1,3	1,8	1,45	1,2
Довжина рулона, м	1,2	1,5	120	1,2
Маса рулона, кг	400	300 - 500	220	270

У країнах Європи зараз використовують тюки прямокутної та рулони циліндричної форм, які застосовують у котлах різної потужності як паливо:

- тюки прямокутного перерізу масою 10-15 кг;
- тюки циліндричного перерізу діаметром 1,5 м, висотою 1,2 м, масою 200-300 кг;
- тюки прямокутного перерізу розміром 0,8 x 0,8 x 1,7 м, масою 150 кг;
- прямокутні брикети "Хеестона" розміром 1,2 x 1,3 x 2,4 м, масою 450 кг;
- є паливом на теплових станціях.

Тюки або рулони, спресовані на полях, завантажують за допомогою навантажувача на транспортні засоби і доставляють у пункти зберігання.

Зберігання рулонів або тюків здійснюється різними способами. За матеріальними витратами способи зберігання можна розділити: просто неба; під пластиком; під брезентом; у коморах, що являють собою дах на опорах ("голландські" комори) або у звичайних закритих сховищах.

Природно, що способи зберігання впливають на стан і якість соломи. Якщо солома зберігається в копицях просто неба, то, приблизно, 10 % її стає непридатною і її не можна використовувати для спалювання. Зберігання під навісами або "голландських" коморах теж призводить до погіршення якості соломи, тому що вміст вологи в зовнішньому шарі, завтовшки до 0,5 м, при цьому може зростати до 25%; але треба зауважити, що всі ці способи зберігання сильно залежать від погоди, окрім зберігання в закритих коморах та консервації тюків у захисні матеріали. Теплові станції зазвичай укладають контракти на щоденне або щотижневе постачання тюків соломи з групою фермерів або з окремими постачальниками. Солома до доставки на станцію є власністю фермера, тому він найбільш зацікавлений у її найкращій якості. Після транспортування на теплову станцію солома зважується. Лабораторія бере зразки соломи для визначення вологості. Якщо солома перевищує допустимий рівень вологості, то її повертають назад.

## **1.5 Висновки до розділу**

1. Аналіз літературних джерел показав, що на сьогоднішній день вітчизняні виробники майже не випускають автономних джерел енергії, що працюють на біопаливі. Більшість наявних і розроблюваних пристроїв є зарубіжними і не завжди пристосовані до наших умов роботи та обслуговування за технікою і щільністю пресування зібраного біопалива.

2. Ті ж із пристроїв, які існують, дуже дорогі й не вирізняються високим ККД і надійністю.

3. На сьогодні не існує вітчизняного автономного джерела енергії, що працює на біопаливі та відповідає сучасним досягненням науки і техніки, а

також забезпечує безперебійну роботу споживача енергії як теплової, так і електричної.

4. Базуючись на вище сказаному, робимо висновок про те, що для українських умов експлуатації потрібен надійний і ремонтно-придатний когенераційний пристрій. Таким пристроєм може бути паровий котел. Для вироблення електроенергії пар, вироблений котлом, буде подаватися на генераторну турбіну, яка виробляє електроенергію. Остання дає змогу зменшити тертя металевих поверхонь, а відповідно збільшити ККД, та інші важливі показники когенераційного пристрою.

## 2 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ

### 2.1 Способи вироблення тепла та електроенергії з поживних залишків злакових культур

Розглянемо технології вироблення тепла й електроенергії на досвіді датських фермерських соломоспалювальних котлів, теплових станцій і станцій комбінованого вироблення тепла й електроенергії.

*Теплові станції.* Теплові соломоспалювальні станції зазвичай класифікують за типом встановленого котла. Нижче вказані види станцій з котлами в Данії за 2017 рік:

- для спалювання різаної соломи;
- для спалювання соломи, подрібненої скарифікатором;
- для спалювання рулонів соломи методом сигарного згоряння;
- періодичної дії (спалювання цілого рулону соломи);
- для спалювання розділених на частини рулонів соломи.

На рис. 2.1 наведено схему теплової станції, на якій рулони соломи спалюють за методом сигарного згоряння [4]. Рулони соломи цілком захоплюються підйомним краном і переміщуються в систему подачі сировини, звідки гідравлічним поршнем безперервно проштовхуються в котел.

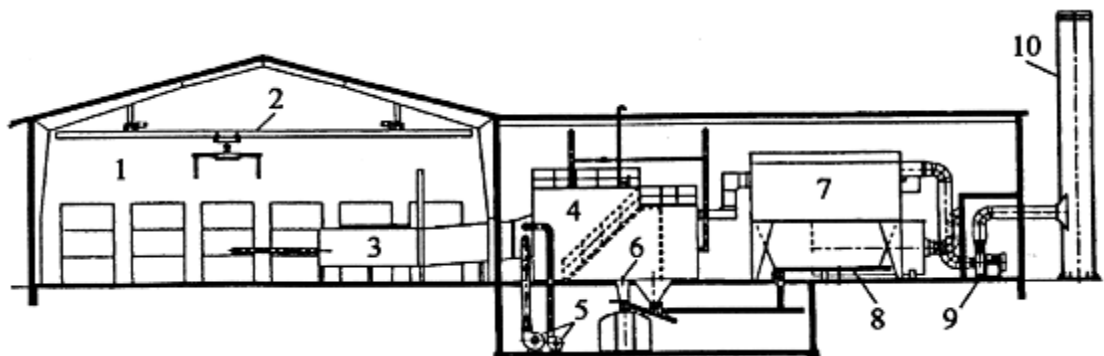


Рисунок 2.1 - Схема теплової станції Sabro

1 - комора для зберігання соломи; 2 - кран-балка; 3 - система подачі сировини; 4 - котел; 5 - повітродувки; 6 - система видалення попелу і шлаку; 7 - тканинний фільтр; 8 - шнековий конвеєр для видалення попелу; 9 - димосос; 10

- димова труба

Рулони згорають з одного кінця в міру просування в топку котла. Тобто, фронт горіння нерухомий, а через нього, згораючи, переміщуються рулони соломи. Під час нагрівання соломи виділяються леткі речовини, які згорають внаслідок подачі вторинного повітря через низку форсунок. Незгорілі частинки соломи та зола з фронту горіння падають на водоохолоджувальну решітку, де відбувається повне догорання сировини. Очищення продуктів згорання відбувається в тканинному фільтрі.

В установках, що використовують подрібнену солому, спалювання відбувається в декількох зонах на рухомих литих металевих решітках.

Солома на решітку подається пневмотранспортом і шнеком. Для кожної зони організовано окрему подачу повітря. Для повноцінного згорання летких речовин також надходить вторинне повітря, яке підводиться через форсунки, розташовані спеціальним чином на стінках котла. З топки котла продукти згорання потрапляють у конвекційний відсік котла, де через стінки віддають основну частину свого тепла циркулюючій воді. Зазвичай на теплових станціях присутній економайзер-теплообмінник, розташований за конвективним відсіком. Ці пристрої збільшують загальний ККД котла. На станції з котлом періодичної дії тюки соломи із завантажувального відсіку надходять у попередню камеру згорання, яка працює як газифікаційна камера.

У попередній камері згорання солома запалюється від контакту з уже палаючою сировиною. Подача повітря регулюється залежно від ступеня згорання газів. У нижній частині котла розташований конвеєр, який повільно переміщує рулони соломи, що горять, у напрямку до топки котла. Нижче наведено дані теплової станції Hvidebek (Данія), що постачає теплом 560 споживачів. Станція обладнана котлом потужністю 5 МВт, конструкція якого розрахована на спалювання суміші палив: соломи (60 %) і відходів різного сільськогосподарського походження (40 %). Рулони перед подачею в котел переробляються спеціальним пристроєм, скарифікатором. Теплова станція



Hvidebek виробляє 66 тис. ГДж/рік, витрата соломи - 3,8 тис. т/рік, рівень викиду летких часток - менш як 40 мг/ нм. Капітальні витрати на будівництво теплової станції (без урахування витрат на будівництво теплової мережі) склали 12,25 млн дол.

*Фермерські котли.* До фермерських котлів можна віднести котли потужністю не більше 1 МВт. Вони зазвичай поділяються на котли періодичної дії та котли з автоматичним завантаженням сировини. Наразі більша частина котлів періодичної дії призначена для спалювання середніх і великих брикетів соломи. Котли різного розміру можуть вміщати від одного циліндричного рулону до кількох рулонів "Хесстона". Принципова схема котла періодичної дії показана на рис. 2.2.

Для збільшення корисної дії процесу горіння і зниження викиду частинок продуктів горіння регулюють подачу повітря, плавно змінюючи від верхньої до нижньої секцій котла. За поступового переміщення області подачі повітря можна досягти рівномірного горіння рулону або тюка соломи.

Щоб забезпечити потрібну концентрацію продуктів горіння, повітря подають у напрямку, протилежному до виходу димових газів із топки котла (горизонтально з того самого кінця топки, де розташовано вихід димових газів, або вертикально згори донизу з-під трубок, якими виходять продукти згорання). Камера згорання котла теплоізолювана. Зазвичай вологість пожнивних залишків злакових культур не перевищує 18 %. Коефіцієнт корисної дії котла з періодичним завантаженням - близько 75 %, концентрація СО в продуктах горіння - менше ніж 0,5 %. Фермерські котли майже завжди обладнані баком-акумулятором для збереження певної температури гарячої води, що дає змогу підвищити якість спалювання, але витрата соломи при цьому, на жаль, істотно не знижується.

Фермерські котли з автоматичною подачею сировини вирізняються тим, що в комплекс входить установка для дозування, яка безперервно й автоматично подає сировину в котел. Виробляються пристрої дозування для рулонів соломи, подрібненої соломи і солом'яних гранул.

Ці водогрійні котли виробляють тільки тепло, немає окремого пристрою відбору пари або гарячої води на турбогенератор. Вони не стабілізують тиск пари, оскільки використовуються лише для опалення. Відповідно частота обертання турбіни, на яку подається пара, буде не постійною, внаслідок чого буде неможливим безперебійне і відповідне ПУЕ забезпечення споживача електроенергією.

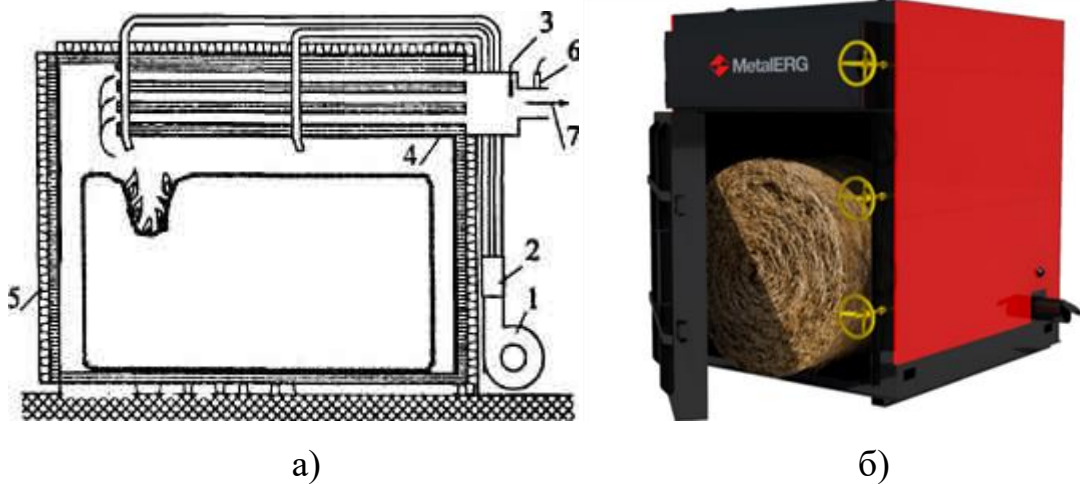


Рисунок 2.2. - Фермерський котел періодичного завантаження для спалювання великих рулонів або тюків соломи (а). Зовнішній вигляд (б)

1 - повітродувка; 2 - повітряна заслінка, регульована за температурою продуктів згоряння; 3 - температурний датчик; 4 - вогнетривкий матеріал; 5 - люк для завантаження брикету соломи; 6 - сенсорний датчик для контролю рівня вмісту кисню в продуктах згоряння; 7 - вихід продуктів згоряння; 8 - тюк соломи

Один із котлів представлений на рис. 2.3, який використовується для забезпечення теплом будівель і споруд та виробничих об'єктів у сільській місцевості, обладнаних системами водогрійного опалення з природною або примусовою циркуляцією. Котел працює в періодичному режимі, спалюючи циліндричні брикети поживних залишків злакових культур діаметром 2 м і висотою 1,9 м.

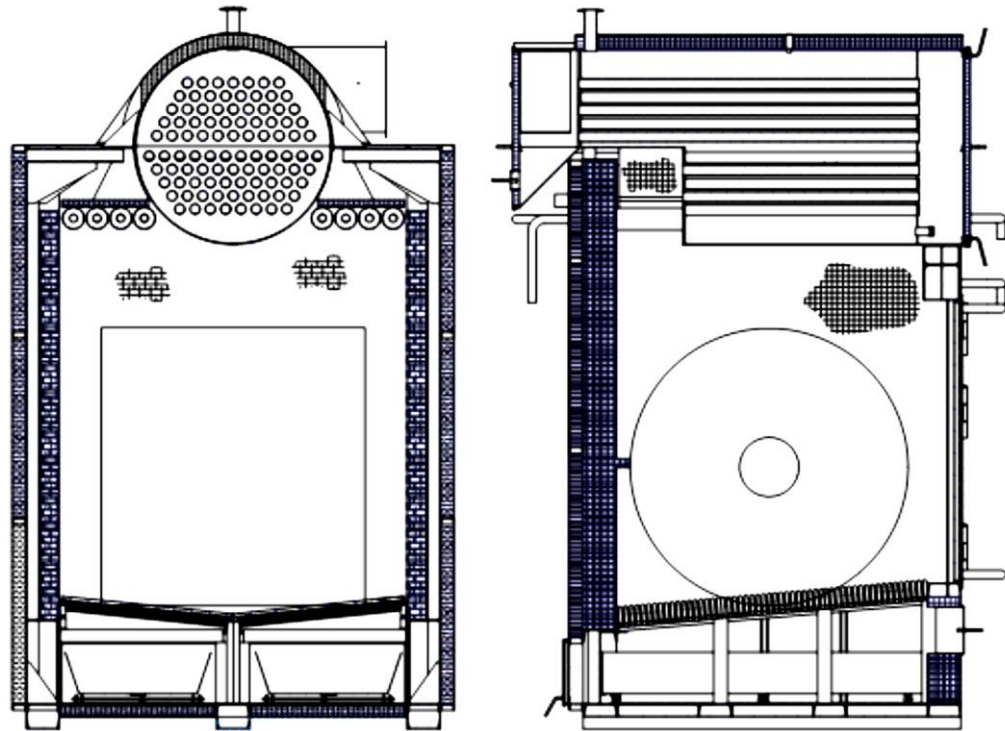


Рисунок 2.3 - Схема водонагрівального котла

Основним видом палива є рулони соломи з вмістом вологи не більше 20 %. Також можна використовувати дрова, відходи деревообробки (але не тирсу) вологістю до 30 %. Топка котла викладена шамотною цеглою. Вгорі над топкою котла розташовується димогарний бак, теплообмінник, усередині якого розташовані два пучки жарових труб.

Безпосередньо у верхній частині топки котла розташовані охолоджувачі склепіння. Міжтрубний простір теплообмінного блоку та охолоджувачі склепіння підключаються до системи опалення.

Рулони соломи розміщуються в нижній частині топки котла, в якій встановлена колосникова решітка. Під колосниковою решіткою встановлена камера для попелу з розміщеними в ній ящиками для вивантаження попелу. У передній стінці камери для попелу розташований пристрій для регульованої подачі повітря в зону горіння, а в задній - топки для вивезення візків із попелом.

Щоб підвищити ефективність горіння палива, в конструкції котла є камера допалювання; вона розташована на вході в теплообмінний блок, а також

пристрій, що полегшує чищення димогарних труб у процесі експлуатації. Для зменшення втрат тепла котел теплоізований шаром мінеральної вати і закритий захисним металевим корпусом.

Подача палива в котел здійснюється спеціальним підйомником - похилим швидкознімним трапом, що дає змогу поліпшити котел у протипожежному плані та зробити його безпечнішим.

Розрахункова потужність котла починається від 600 кВт. При цьому, тиск води, що нагрівається, близько - 0,4 (4,0) МПа (атм); максимальна температура ж становить - 95°C. Розміри установки (довжина x ширина x висота) 3,3 x 3,2 x 5,7 м, маса - 12,8 т.

Виробники котла особливо виокремлюють той факт, що теплотворна здатність соломи становить приблизно 60 % від теплотворної здатності кам'яного вугілля, і в тих регіонах, де є надлишкові маси соломи, її економічно вигідно використовувати як альтернативне поновлюване джерело енергії. А зекономлені бюджетні кошти, що витрачаються на закупівлю еквівалентної кількості вугілля, спрямувати на використання для інших цілей.

Солома є екологічно чистим видом палива, тому що під час її спалювання виділяється така сама кількість CO<sub>2</sub>, що й під час природного її розкладання. Тому її зараховують до палив, які не спричиняють парникового ефекту і забруднення навколишнього середовища.

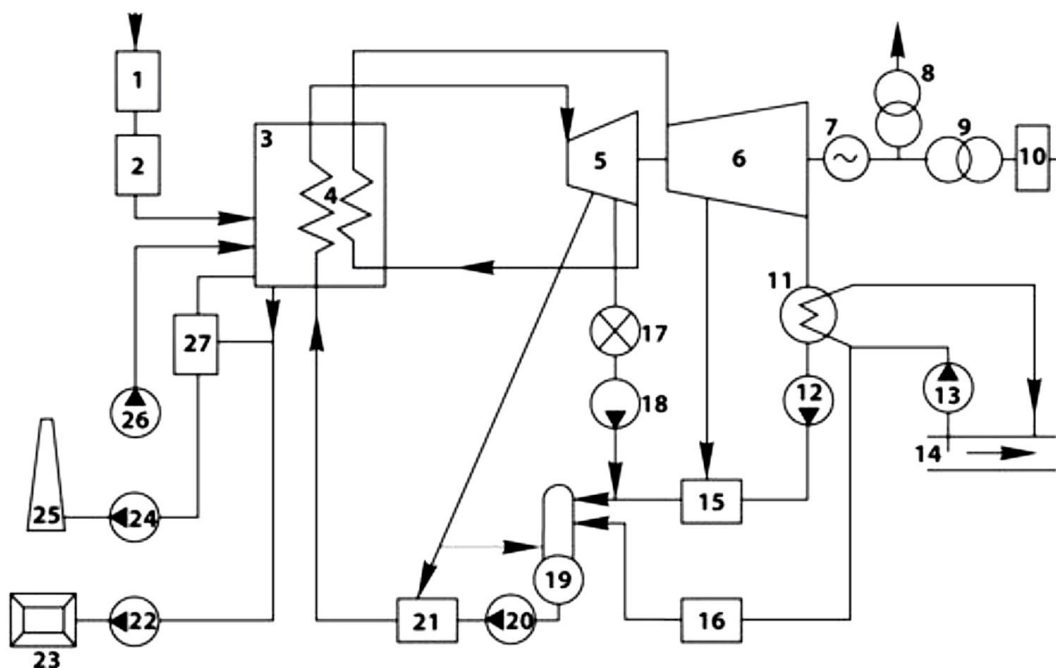
Ці теплові установки зазвичай застосовуються в малій або автономній енергетиці теплопостачання. Але також котельна установка могла б використовуватися в сільському господарстві для невеликих зерносушильних комплексів, особливо у віддалених і важкодоступних районах, куди економічно недоцільно проводити газ і дорого використовувати електронагрів.

## **2.2 Станції комбінованого вироблення тепла та електроенергії**

Котельні станції для окремого або спільного вироблення тепла та електроенергії створюють потужність від 7 до 68 МВт. У Данії діють 17 котлів

комбінованого вироблення тепла та електроенергії (КТЕ), які використовують як сировину поживні рештки злакових культур та інші види біомаси, вони виробляють до 28 МВт електричної потужності (табл. 2.4) [2].

Більшість таких котлів працюють під високим тиском, мають парові турбіни, електрогенератори та теплообмінники. Данський уряд підтримує енергетичну політику переходу на альтернативні види палива і всі теплові станції, що працюють на вуглеводневому паливі, поступово реконструюють на станції КТЕ, що працюють на природному газі та біомасі. На рисунку 2.4 наведено схему станції КТЕ в Rudkøbing [5]. Солому перед тим як завантажити в котел подрібнюють скарифкатором і через три завантажувальні лійки вона надходить у котел на решітки, спочатку на нерухому водоохолоджувану решітку, далі на вібраційну, на якій закінчується процес горіння.



- |                                      |   |   |
|--------------------------------------|---|---|
| 1 - паливне господарство;            | 2 - підготовка палива;                                    | 3 - котел;  |
| 4 - проміжний пароперегрівач;        | 5 - частина високого тиску парової турбіни (ЧВТ або ЦВТ); | 6 - частина низького тиску парової турбіни (ЧНТ або ЦНТ); |
| 7 - електричний генератор;           | 8 - трансформатор власних потреб;                         | 9 - трансформатор зв'язку;                                |
| 10 - головний розподільний пристрій; | 11 - конденсатор;   | 12 - конденсаційний насос;                                |
| 13 - циркуляційний насос;            | 14 - джерело водопостачання (наприклад, річка);           | 15 - водопідготовча установка (ВПУ);                      |
| 17 - споживач теплової енергії;      | 18 - насос зворотного конденсату (ПНТ)                    | 19 - деаератор;   |
| 20 - живильний насос;                | 21 - підігрівач високого тиску (ПВТ);                     | 22 - шлакозола-видалення;                                 |
| 23 - золівідвал;                     | 24 - димосос (ДС);  | 25 - димова труба;  |
| 26 - дуттьовий вентилятор;           | 27 - золовловлювач  |   |

Рисунок 2.4 - Схема автономного когенераційного джерела енергії

Таблиця 2.4 - Характеристики комбінованих установок

Назва	Паливо	Технологія	Потужність МВт <sub>Е</sub> /МВт <sub>Т</sub>
Aarhus	солома, вугілля	мультициркулюючий киплячий шар	20/н.д.
Haslev KVV	солома	сигарне згорання	5,0/11,0
Slagelse KVV	солома	горіння на решітці	12/28,0
Rudkobing KVV	солома	згорання в котлі на решітці	2,3/7,8
Vejen	відходи - 70...75, солома - 15...20, деревна тріска - 5...10, вугільний пил - 5... 8 %	циркулюючий киплячий шар	3,0/9,0
Grenaa KVV	солома - 50% вугілля - 50%	згорання в котлі на решітці	28,0/68,0
Mabjerg KVV (Holsterbo)	відходи -60%, солома і деревна тріска - 35%	згорання в котлі на решітці	8,3/20,8
Masnedo KW	солома -100%, додатково деревна тріска -0...30%	спалювання додаткового палива	30,0/н.д.
Studstrup (Midtkraft), котел MKSI	солома	сигарне згорання	9,8/60,0
Ostkraft	деревна тріска - 20%	спалювання додаткового палива	7,0/н.д.

Відходи горіння (шлак) збираються у водоохолоджуваний бункер і видаляються. Котельна станція також обладнана баком резервуаром для збереження заданої температури конденсації тепла за невисокої витрати тепла споживачем. Залежно від розміру резервуара, станція може працювати в зимовий період 5-10 годин на добу.

Оскільки попел соломи має відносно низьку температуру розм'якшення, є небезпека того, що леткі частинки попелу, що зноситься, можуть стати твердими відкладеннями на трубах котла, якщо температура продуктів горіння і пари перевищить допустимий рівень. Щоб не допустити цього, температура перегріву пари обмежується 450 °С. Температура в пароперегрівачах для продуктів горіння не повинна перевищувати 700 °С. І якщо температура поверхні труб перевищує 450 °С то це призводить до небезпеки збільшення корозії.

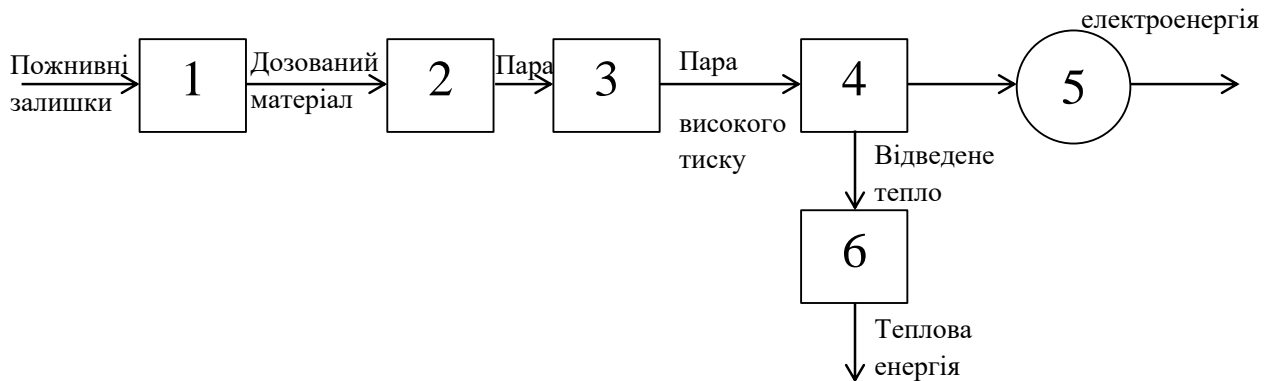
Тому, найвища температура пари не повинна вираховуватися тільки на підставах міцності матеріалів, з яких виготовляються труби та інші пристрої.

Продукти згорання соломи, що не піддаються очищенню, мають у своєму складі частинки попелу, що зноситься, в близько 1000-5000 мг /  $\text{nm}^3$ , це залежить від моделі котла та інших причин. Теплова станція Rudkobing для очищення продуктів згорання використовує спеціальні електрофільтри. Емісія твердих частинок після електрофільтра нижче 40 мг/ $\text{nm}^3$ . Емісія  $\text{SO}_2$ ,  $\text{C}_x\text{H}_y$ , поліароматичних вуглеводнів і діоксинів дуже низька. Станція відповідає нормативним вимогам щодо викидів у навколишнє середовище.

З викладеного випливає, що наразі не існує достатньо простої і водночас надійної схеми приготування енергоносія для отримання теплоти та електрики одночасно.

Використовуючи енергію спалюваних поживних залишків, у роботі запропоновано наступну блок-схему (рис. 2.5) автономного когенераційного джерела енергії, що дає змогу для потреб фермерського господарства одержувати одночасно теплову й електричну енергію шляхом використання тиску перегрітої (сухої) пари, одержуваної в котлі та приводить в обертальний

рух турбогенератор.



- 1 - завантажувальний пристрій з керованою подачею;
- 2 – котел;
- 3- пароутворювач;
- 4- турбіна;
- 5- електрогенератор;
- 6- перетворювачі теплоти

Рисунок 2.5 - Блок-схема автоматичного когенераційного джерела енергії для отримання тепла та електроенергії для потреб фермерського господарства

Виходячи із середньостатистичного фермерського господарства з річними обсягами поживних залишків злакових культур, що дорівнюють 105,2 т., добове споживання соломи складе 240 кг. Якщо ентальпія (тепловміст) 1 кг соломи дорівнює 1200, то добова потреба для господарства становить  $3,36 \cdot 10^5$ . Ці ккалорії мають бути розподілені на вироблення тепла для опалення площі  $120 \text{ м}^2$  і вироблення електроенергії сумарною споживчою потужністю у 8 кВт.

### 2.3 Висновки до розділу

1. Розглянуто технології вироблення тепла й електроенергії на досвіді датських фермерських солomosпалювальних котлів, теплових станцій і станцій комбінованого вироблення тепла й електроенергії.
2. Виробники котлів особливо виокремлюють той факт, що теплотворна здатність соломи становить приблизно 60 % від теплотворної



здатності кам'яного вугілля, і в тих регіонах, де є надлишкові маси соломи, її економічно вигідно використовувати як альтернативне поновлюване джерело енергії. А зекономлені бюджетні кошти, що витрачаються на закупівлю еквівалентної кількості вугілля, спрямувати на використання для інших цілей.

3. Встановлено, що наразі не існує достатньо простої і водночас надійної схеми приготування енергоносія для отримання теплоти та електрики одночасно.
4. Запропоновано блок-схему (рис. 2.5) автономного когенераційного джерела енергії, що дає змогу для потреб фермерського господарства одержувати одночасно теплову й електричну енергію шляхом використання тиску перегрітої (сухої) пари, одержуваної в котлі та приводить в обертальний рух турбогенератор.

## 3 РОЗРАХУНКОВИЙ РОЗДІЛ

### 3.1 Визначення потужності парового котла

В основу визначення потужності парового котла покладено дані середньостатистичного фермерського господарства. Річна потреба цього господарства в соломі становить 105,2 т; добова потреба - 240 кг.

За ентальпії 1 кг соломи, що дорівнює 1200 ккал/кг, добова потреба в ккал становить  $3,36 \cdot 10^5$  ккал, які мають бути розподілені на вироблення тепла для опалення площі в 120 м<sup>2</sup> і вироблення електрики сумарною споживчою потужністю в 8,15 кВт.

Якщо 1 ккал. дорівнює 4,19 Дж [6], то  $3,36 \cdot 10^8 \text{ ккал} \cdot 4,19 \text{ Дж} = 14,08 \cdot 10^8$  Дж. З розрахунку, що паровий котел працюватиме цілодобово, тобто всі 24 години, то абсолютна (корисна) потужність котла становитиме

$$N_k = \frac{14,08 \cdot 10^8}{24 \cdot 3600 \cdot 10^3} = 16,3 \text{ кВт} \quad (3.1)$$

З них на вироблення електроенергії 8,15 кВт, а решта 8,15 кВт - на опалення приміщень.

### 3.2 Форми та робочої площі лопатки активної турбіни паросилової установки

Під час проектування парових турбін особливу увагу приділяють вібраційній характеристиці їхніх лопаток. Зусилля, що діють на лопатку, мають періодичні складові і, якщо ці складові збігаються з власною частотою лопаток, то виникає явище резонансу, за якого навіть невеликі періодичні (циклічні) зусилля спричиняють значну вібрацію, яка може спричинити поломку. З досвіду експлуатації турбін відомо [7], що на вібраційні характеристики лопатки значно впливають її форма, робоча площа, а також відношення довжини лопатки до її радіуса кривизни. Крім того, від вибору конструкції

лопаток залежить потужність турбіни та її економічність, тобто, її ККД. Тому оптимізація форми та робочої площі лопаток парових турбін є невід'ємною частиною під час розроблення, проектування та виготовлення паросилових установок.

Оптимізація здійснюється, як правило, через багатofакторний експеримент на підставі численних дослідних даних.

Для розв'язання цієї задачі в враховано фактори, отримані в результаті проведення апріорного їх ранжування (20 опонентів), - це площа і форма лопатки, а також співвідношення довжини лопатки "l" і радіуса R її кривизни. При цьому, для прямої лопатки це співвідношення позначено як (3.2)

$$m_{np.} = \frac{l}{R} = 0 \quad (3.2)$$

Опис поверхні відгуку було виконано рівнянням другого порядку для трьох чинників (ортогональний план) де y - функція відгуку регресійної залежності параметрів, що визначають площу і форму лопаток

$$y = b_0 + b_1z_1 + b_2z_2 + b_3z_3 + b_{12}z_1z_2 + b_{13}z_1z_3 + b_{23}z_2z_3 + b_{11}z_1^2 + b_{22}z_2^2 + b_{33}z_3^2 \quad (3.3)$$

Після реалізації матриці планування, представленої в таблиці 3.1, було підраховано коефіцієнти регресії та величини їхніх довірчих інтервалів, що наведено в таблиці 3.2.

За знайденими коефіцієнтами регресії складаємо рівняння регресії другого порядку для опису поверхні відгуку

$$y = 0,6012 + 0,0654z_1 + 0,0045z_2 + 0,0275z_3 - 0,0039z_1z_2 + 0,0750z_1z_3 + 0,0246z_2z_3 - 0,0783z_1^2 + 0,0458z_2^2 - 0,0346z_3^2 \quad (3.4)$$

Адекватність моделі другого порядку перевіряли за допомогою критерію Фішера, і вона дала хороші результати з 95 % - ною ймовірністю, оскільки

$$F_{розрах} = 0,12 < F_{таб} = 2,1 \quad (3.5)$$

Таблиця 3.1 - Матриця ортогонального планування

Зміст плану	Порядковий номер даних	Z <sub>0</sub>	Z <sub>1</sub>	Z <sub>2</sub>	Z <sub>3</sub>	Y
План 2 <sup>3</sup>	1	+	+	+	+	0,7385
"Зоряні" Точки c a'=1,215	2	+	+	+	-	0,4378
	3	+	+	-	+	0,6783
	4	+	+	-	-	0,5066
	5	+	-	+	+	0,4836
	6	+	-	+	-	0,5136
	7	+	-	-	+	0,4385
	8	+	-	-	-	0,5364
	9	+	+1,215	0	0	0,5997
	10	+	-1,215	0	0	0,3308
	11	+	0	+1,215	0	0,6633
	12	+	0	-1,215	0	0,6336
	13	+	0	0	+1,215	0,5276
	14	+	0	0	-1,215	0,5629
	Нульова точка	15	+	0	0	0

Таблиця 3.2 - Значення коефіцієнтів регресії та величини їхніх довірчих інтервалів

Позначення	Величина	Довірчий інтервал	Позначення	Величина	Довірчий інтервал
b <sub>0</sub>	0,6012	±0,0171	b <sub>22</sub>	0,0458	±0,0069
b <sub>1</sub>	0,0654	±0,0027	b <sub>33</sub>	-0,0346	±0,0069
b <sub>2</sub>	0,0045	±0,0027	b <sub>12</sub>	-0,0039	±0,0037
b <sub>3</sub>	0,0275	±0,0027	b <sub>13</sub>	0,0750	±0,0037
b <sub>11</sub>	-0,0783	±0,0069	b <sub>23</sub>	0,0246	±0,0037

Отже, за критерієм Фішера цю модель було прийнято.

Аналіз поверхні відгуку проводили за допомогою двовимірних перерізів.

Для цього рівняння піддалося канонічному перетворенню, яке в стандартній канонічній формі має вигляд

$$Y - 0,658 = -0,1822z_1^2 + 0,0575z_2^2 + 0,0575z_3^2 \quad (3.6)$$

Канонічне рівняння вивчали за допомогою двовимірних перерізів.

Досліджували вплив форми лопатки турбіни та її площі на співвідношення "m" при  $z_1=0$ . Для отримання цього перерізу підставляємо значення  $z_1=0$  у рівняння. У результаті маємо

$$y = 0,6012 + 0,0045z_2 + 0,0275z_3 + 0,0246z_2z_3 + 0,0458z_2^2 - 0,0346z_3^2 \quad (3.7)$$

Визначаємо координати центру поверхні диференціюванням рівняння (4.7) та розв'язанням системи рівнянь

$$\begin{cases} \frac{dy}{dz_2} = 0,0045 + 0,0246z_3 + 0,0916z_2 = 0; \\ \frac{dy}{dz_3} = 0,0275 + 0,0246z_2 + 0,0916z_3 = 0; \end{cases} \quad (3.8)$$

$$z_{2s} = -0,1432; \quad z_{3s} = -0,349.$$

Підставляючи значення  $z_{2s}$  і  $z_{3s}$  у рівняння (3.7), отримуємо значення коефіцієнта "m":  $Y_s = 0,597$ : ( $m \equiv Y$ ).

Для проведення канонічного перетворення рівняння (3.7) розв'язуємо характеристичне рівняння

$$f \ B = \begin{vmatrix} 0,0458 - B & 0,0123 \\ 0,0123 & -0,0346 - B \end{vmatrix} = 0 \quad (3.9)$$

Власними числами (корінням) цього характеристичного рівняння були  $B_{22}=0,0476$ ;  $B_{33}=-0,0364$ .

Саме рівняння в канонічній формі запишеться

$$y - 0,597 = -0,0476z_2^2 - 0,0364z_3^3 \quad (3.10)$$

Правильність отриманих обчислень підтверджується перевіркою, тобто, порівнянням сум коефіцієнтів при квадратичних членах:

$$0,0476 + (-0,0364) = 0,0112$$

$$0,0458 + (-0,0346) = 0,0112.$$

Кут повороту осей координат у точці S знайдено за формулою

$$\operatorname{tg} 2a_s = \frac{B_{23}}{B_{22} - B_{33}} = \frac{0,0246}{0,0458 + 0,0346} = 0,30597 \quad (3.11)$$

тобто,  $a_s = 8^\circ 30' 22,58''$ .

Слід зазначити, що якщо кут повороту  $a_s$  - додатній, то осі в центрі повертаються проти годинникової стрілки. Підставляючи різні значення  $Y$  у рівняння (3.10), отримуємо рівняння відповідних контурних ліній - гіпербол, які в сукупності представляють ціле сімейство сполучених гіпербол ліній рівного значення коефіцієнта "m" (рис. 3.1).

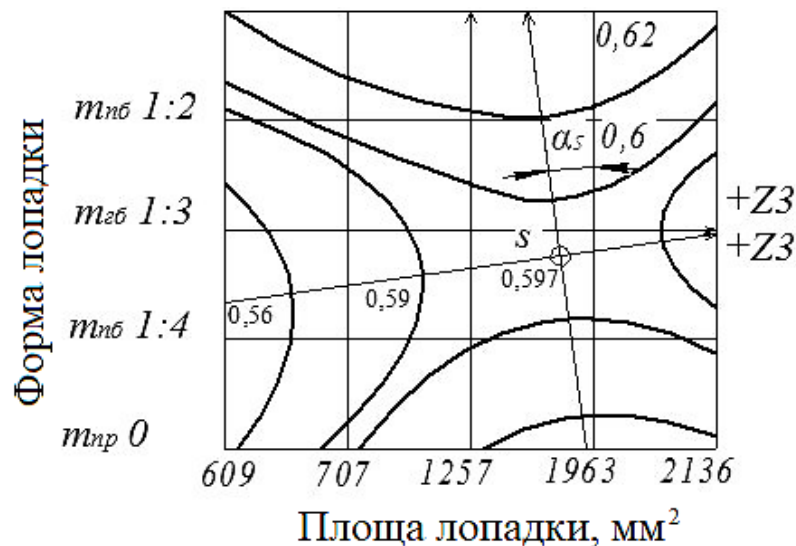


Рисунок 3.1- Двовимірний переріз поверхні відгуку за умови  $z_1=0$   
форма параболічної -  $m_{пб}$ ; гіперболічної -  $m_{гб}$  лопаті

З формули (3.10) і графіка (рис. 3.1) випливає, що максимальне значення "m" у розглянутому перерізі поверхні відгуку за інших чинників ( $z_2$  і  $z_3$ ), узятих на зазначених рівнях, розташоване між значеннями  $m_{пб} = 0,25$  і  $m_{гб} = 0,33(3)$  і

дорівнює 0,597. Площа лопатки перебуває в діапазоні від 1257 до 1963 мм<sup>2</sup>. Ці значення ближче до лопатки гіперболічної форми із середньою її робочою площею, що дорівнює 1610 мм<sup>2</sup>.

З цього можна зробити висновок, що оптимальною формою лопатки парової турбіни є лопатка гіперболічної форми з робочою площею, що дорівнює 1610 мм<sup>2</sup>.

Аналогічним способом було побудовано і два двовимірні перерізи, що зображені на рис.3.2 і рис.3.3.

З метою оцінювання впливу чинників " m " і площі лопатки (z<sub>3</sub>) на її форму розглядали двовимірний переріз поверхні відгуку за умови z<sub>2</sub>=0.

Лінії рівних рівнів являють собою еліпси (рис.3.2), що відповідають канонічному рівнянню

$$y - 0,667 = 0,0999z_1^2 - 0,0131z_3^2 \quad (3.12)$$

з центром, розташованим поза полем експерименту (z<sub>1S</sub>=1,264; z<sub>3S</sub>=1,767), кут повороту нових осей координат становить α<sub>s</sub>=-29°53'9,73".

Максимальне значення критерію оптимізації становить 0,667 (рис. 3.2).

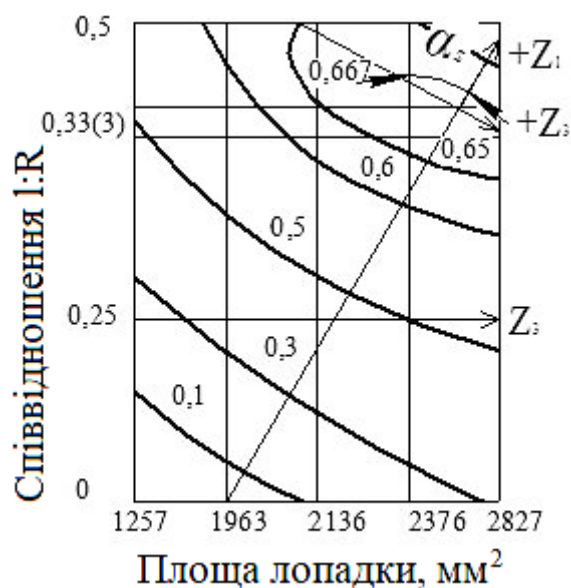


Рисунок 3.2 - Двовимірний переріз поверхні відгуку за умови z<sub>2</sub>=0

Аналіз цього двовимірного перерізу показує, що значення 0,667 відповідає гіперболічній формі лопатки (0,33(3)) з її середньою робочою площею, що дорівнює 2601,5 мм<sup>2</sup>. (рис. 3.2).

Після підстановки  $z_3=0$  у рівняння (3.12) і перетворень, рівняння регресії в канонічній формі запишеться

$$Y - 0,615 = 0,0458z_2^2 - 0,0783z_1^2 \quad (3.13)$$

Лініями рівних рівнянь є гіперболи з центром, що знаходиться в зоні експерименту (рис. 3.3).

$$z_{1S} = 0,4172; z_{3S} = -0,0312$$

Кут повороту нових осей координат  $\alpha_s = 0^\circ 53' 59,97''$ .

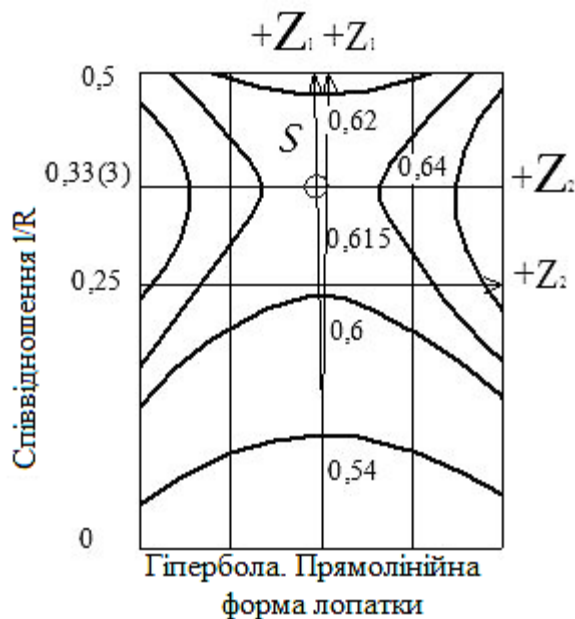


Рисунок 3.3 - Двовимірний переріз поверхні відгуку при  $z_3=0$

З аналізу функції відгуку (рис.3.3) випливає, що оптимальним значенням критерію є значення 0,615, відповідні значенню 0,33(3) для прямолінійної та гіперболічної лопатки. Збільшення цього значення від центру "S" двовимірного перерізу є кращим для гіперболічної форми лопатки (рис.3.4).

Таким чином, з аналізу функції відгуків (рис.3.1; рис.3.2; рис.3.3) випливає, що з усіх трьох досліджених форм лопаток активної парової турбіни



гіперболічна форма є найкращою із середньою робочою площею, що дорівнює  $2105,75 \text{ мм}^2$ . На рис.3.4 ця лопатка показана.

Для парових турбін використовуються гіперболічні форми лопаток із гострими та обтічними крайками.

З метою зменшення турбулентності потоку пари, що діє на лопатку, гіперболічну лопатку прийнято з обтічними краями (рис.3.4).

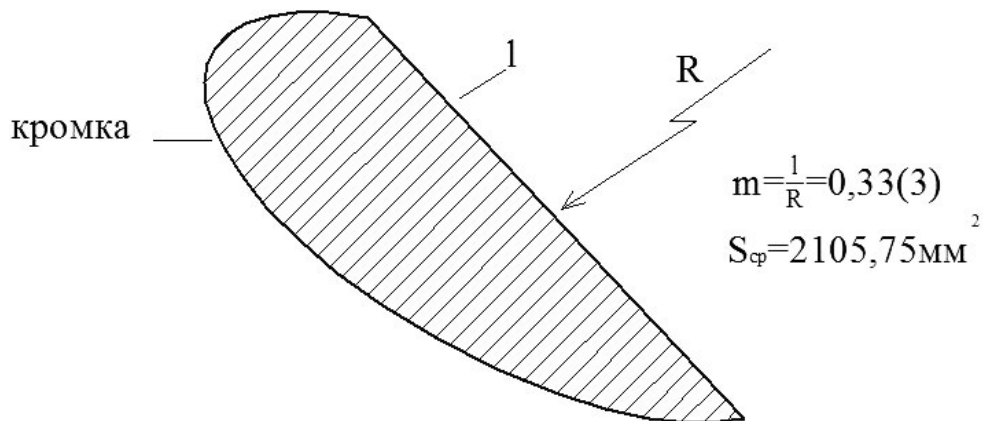


Рисунок 3.4 - Гіперболічна лопатка з обтічним краєм

### 3.3 Вибір натурального зразка парового котла

Користуючись теорією подібності, можна будувати моделі так, що в них протікатимуть явища, подібні до явищ як у натуральних зразках. Правила моделювання впливають із теорій подібності. Для того, щоб модель була подібна до натурального зразка, необхідно дотримуватися таких умов:

- геометрична подібність моделі та зразка;
- зміна фізичних констант пари в усьому об'ємі моделі має відбуватися за тим самим законом, що і в натурі;
- початкові та граничні умови в моделі та в зразку (натурі) мають бути пропорційними;
- одночасні безрозмірні визначальні критерії подібності мають бути відповідно рівними.

Такий підхід моделювання називається зворотним - від природи до моделі.

У нашому випадку моделювання здійснюється від моделі до природи, оскільки імітаційна модель, на якій проводилися дослідження, була взята

довільно.

Для визначення основних параметрів натурального котла є такі критерії подібності, що описують процес приготування пари, - це критерії Рейнольдса, Прандля, Пекля і Нуссельта.

Перший критерій визначає режим руху сухої пари в паропроводі; другий - здатність поширення тепла; третій - є мірою перенесення тепла в топці; четвертий - інтенсивність тепловіддачі пари.

У зв'язку з тим, що основний процес у паросилової установці пов'язаний із динамікою руху сухої пари в паропроводі, то за початкові умови цього процесу приймаємо такі параметри:

- діаметр паропроводу імітаційної установки,  $d_{\text{пр}}=0,025\text{м}$ ;
- середню швидкість руху сухої пари в паропроводі імітаційної установки,  $v_{\text{сп}}=14\text{ м/с}$ ;
- температуру ненасиченої (сухої) пари,  $t=200\text{ }^{\circ}\text{C}$  і її густину -  $\rho_{\text{п}}=10\text{ кг/м}$ .

Залишається за цими початковими параметрами визначити чисельні значення зазначених критеріїв подібності.

### 1. Критерій Рейнольдса

$$R_e = \frac{v_{\text{сп}} \cdot d}{\nu} \quad (3.14)$$

где  $\nu = 48,2 \cdot 10^{-6}$

- кінематична в'язкість сухої пари при  $t=200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $\text{м}^2/\text{с}$  [7];

$$R_e = \frac{10 \cdot 0,025}{48,2 \cdot 10^{-6}} \cong 5 \cdot 10^3 \quad (3.15)$$

Як бачимо  $R_e > 2300$ . Отже, режим руху пари в трубі турбулентний.

2. Критерій Прандля для цих умов  $P_r = 0,72$ .

3. Критерій Пекле

$$P_e = R_e \cdot P_r = 5 \cdot 10^3 \cdot 0,72 = 3,6 \cdot 10^3.$$

### 5. Критерій Нуссельта

Еквівалентний діаметр паропроводу

$$d_{екв} = \frac{4f}{\Pi} \quad (3.16)$$

де  $f = \frac{\pi \cdot d_{мп}^2}{4}$  - площа поперечного перерізу парової труби;

$\Pi$  - периметр парової труби,  $\pi d_{мп}$  .

$$d_{екв} = \frac{4 \cdot \pi \cdot d_{мп}^2}{4 \cdot \pi \cdot d_{мп}} = d_{мп} \quad (\text{оскільки заповнення труби паром з коефіцієнтом}$$

заповнення  $K_3=1$ ).

$$N_U = \frac{\alpha \cdot d_{екв}}{\lambda} \quad (3.17)$$

де  $\alpha = 30$  - коефіцієнт тепловіддачі сухої пари [7];

$\lambda = 5,64 \cdot 10^{-2}$  ккал/м.ч.град - коефіцієнт теплопровідності.

$$N_U = \frac{30 \cdot 0,025 \cdot 10^2}{5,64} \cong 11,17$$

Крім того, за отриманими теоретичними даними інформація за параметрами парового котла така:

- тиск сухої пари в середньому - 3,43 Па.
- паропроодуктивність котла, в середньому, не менше - 20 кг.пару/год;
- температура сухої пари, в середньому 200°C;
- густина сухої пари, в середньому 10 кг/м ;
- ККД котла, в середньому 0,35;
- потужність котла, в середньому 16,3 кВт;
- кількість спалюваної соломи на годину, в середньому, 6 кг.

Параметри натурального парового котла мають бути не нижчими за зазначені. Виходячи з цього і обчислених критеріїв подібності, найближчим паровим котлом є котел ПТК Лідер-5М (виробництво Україна), опис принципу дії та характеристики якого наводяться нижче (рис. 3.5 і 3.6).



Рисунок 3.5 - Котел паровий ПТК Лідер-5М

**Характеристика парових котлів ПТК «ЛІДЕР-5М»**

Робочий тиск пари, кгс / см <sup>2</sup>	4
Продуктивність:	
- при опаленні рідким паливом	200
- при опаленні дровами	130
Поверхня нагріву, м <sup>2</sup>	
- котла	3,67
- економайзера	1,82
Об'єм, м <sup>3</sup>	
- водяний	0,172
- паровий	0,042
Термін розігріву котла, хв	30 – 40
Розміри котла (без труби)	
- висота	1740
- ширина	875
- довжина (с форсункой)	1340
Вага котла (без води), кг	530

Рисунок 3.6 – Характеристики котла

Котли парові використовуються при створенні систем опалення житлових, виробничих і адміністративних будівель і споруд (рисунок 4.5.). Крім того, вони можуть з успіхом застосовуватися в таких технологічних процесах, як виробництво пінополістиролу, виготовлення залізобетонних конструкцій, очищення парою цистерн і ємностей для зберігання ПММ. У сільському господарстві парові котли застосовуються для опалення тваринницьких комплексів, теплової обробки кормів і продукції, а також для отримання електрики.

Парові котли не потрапляють під дію такого нормативного акту, як "Правила влаштування і безпечної експлуатації посудин, що працюють під тиском", а, отже, немає необхідності оформляти реєстрацію в котлонагляді.

### 3.4 Визначення паропродуктивності та тиску пари в котлі імітаційної установки для електропостачання

Використовуючи детерміновані залежності моделі імітаційної установки з параметрами:  $V = 1\text{ м}^3$  - об'єм котла;  $m_b = 5\text{ кг}$  - залита в котел вода з  $t = 22\text{ }^\circ\text{C}$ ;  $t\text{ }^\circ\text{C} = 200\text{ }^\circ\text{C}$  - задана температура пари (таблиця 2.2);  $\rho_n = 10\text{ кг / м}^3$  - густина сухої пари (таблиця 2.2); було зроблено розрахунок на кількість одержуваної пари і її тиск.

$$\text{Маса одержуваної пари } D_n^k = m_n = \rho_n \cdot V_k = 10 \cdot 1 = 10\text{ кг}$$

Оскільки  $m_n > m_g$ , то вся залита в котел вода перетворилася на пару і вона стала сухою (ненасиченою). Отже, можна вважати, що  $m_n = m_g$ .

Тиск цієї пари визначається за вказаними вище детермінованими залежностями моделі імітаційної установки з рівняння стану термодинамічної системи [7].

$$P_{nTEOP} = \frac{m_g}{M} \cdot R \cdot T \quad (3.18)$$

де  $T = 273^\circ + 200^\circ = 473^\circ\text{ K}$ ;

$$M = 18 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{моль}} \quad - \text{ постійний коефіцієнт}$$

$$R = 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}} \quad - \text{ постійний коефіцієнт, (молярна газова стала)}$$

$$P_{\text{ТЕОР}} = \frac{5 \cdot 8,31 \cdot 473}{18 \cdot 10^{-3}} = 10,6 \text{кПа}$$

Чистий ККД котла - 0,35.

$$\text{Звідки, } P_{\text{дійсне}} = 10,6 \cdot 0,35 = 3,71 \text{кПа}$$

Кількість згорілої соломи  $m_c = 3 \text{кг}$ . Щільність соломи в тюку  $\rho_c = 240 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ .

Діаметр тюка - 1,3 м; довжина тюка - 1,2 м;  $m_{\text{мс}} = 400 \text{ кг}$  – маса тюка соломи;  $V_c = 1,68 \text{ м}^3$  - об'єм тюка соломи.

У піч котла було закладено 3 кг маси соломи  $\rho_c = 240 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$

10 кг пари було отримано впродовж 8,5 хв ( $\sim 0,18$  години). Отже, за годину роботи котла, якщо залишати його об'єм постійним, можна отримати 70,6 кг/год пари з дійсним її робочим тиском у 3,71 кПа.

На рис. 3.7 показано падіння тиску пари в котлі імітаційної установки залежно від витрати пари в кг/с. (табл. 3.5)

Якщо витрата пари розподіляється порівну (по 50 %) на тепломережу і турбогенератор, то робоча точка "А" системи "котел-паропровід із турбогенератором" імітаційної паросилової установки визначатиметься перетином кривих  $P_{k_i} = f_1 D_i$  і  $P_{\text{турб}_i} = f_2 D_i$  (рис.3.8), які апроксимовані кривими (3.19) (3.20):

$$P_{k_i} = 3,71 \cdot 10^5 - 25 \cdot 10^7 \cdot D_i^2 \cdot \rho_n \cdot g; \quad (3.19)$$

$$P_{\text{турб}_i} = 0,925 \cdot 10^5 - 16,5 \cdot 10^7 \cdot D_i^2 \cdot \rho_n \cdot g. \quad (3.20)$$

Таблиця 3.5 - Середні значення падіння тиску сухої пари в котлі від її витрати в тепломережу і на турбогенератор

Р, Па	$3,71 \cdot 10^5$	$3,24 \cdot 10^5$	$2,32 \cdot 10^5$	$1,392 \cdot 10^5$	0
Д, кг/с	0	$75 \cdot 10^{-5}$	$15 \cdot 10^{-4}$	$22,5 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^5$

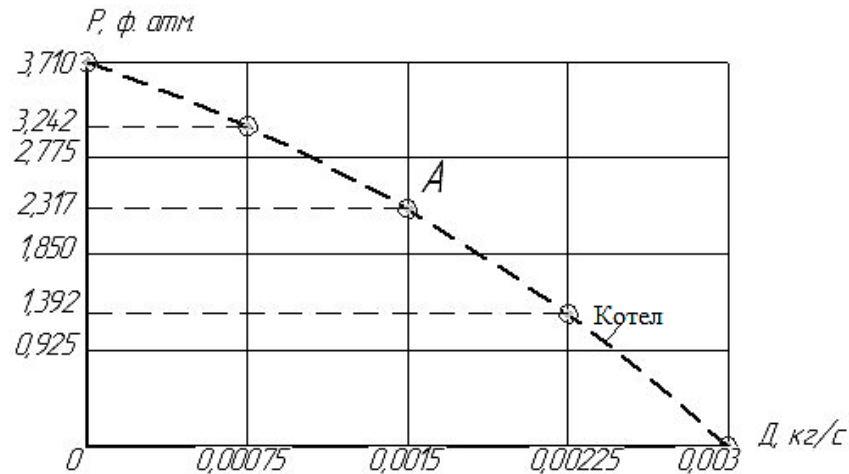


Рисунок 3.7 - Падіння тиску пари в котлі імітаційної установки від секундної витрати пари

На графіках рисунків 3.7 і 3.6 підвищення тиску в системі "паропровід + турбогенератор" повинно підтримувати тиск пари в котлі. У цьому разі можливе регулювання генератора турбіни з погляду сталості напруги струму в електромережі.

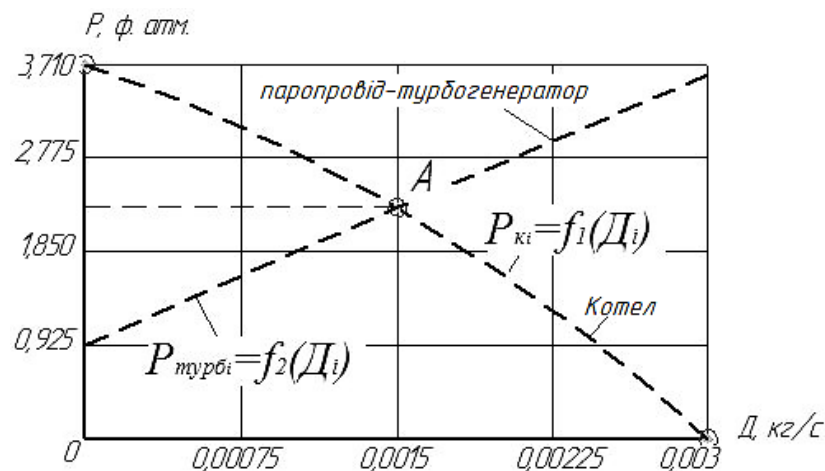


Рисунок 3.8 - До визначення робочої точки "А" котла і системи "паропровід + турбогенератор" імітаційної паросилової установки

Із графіків на рисунках 3.8 і 3.7 також впливає, що натурна паросилова установка повинна мати в робочій точці системи (точка "А") такі основні характеристики: тиск сухої пари в котлі, в середньому, не нижчий за 3,43 фіз. атм.; паропродуктивність котла, у середньому, не менше 20 кг пари/год; температуру сухої пари, в середньому, не нижче 200 °С і густину сухої пари - не нижче 10 кг/м<sup>3</sup>.

### **3.5 Визначення параметрів турбогенератора паросилової установки для електропостачання**

Перш ніж робити розрахунок параметрів парової турбіни, наведемо коротку класифікацію наявних парових турбін.

Парові турбіни класифікують за такими ознаками.

1. За способом дії пари на лопатки: активні, якщо всі ступені тиску турбіни чисто активні або мають невеликий ступінь реакції (0,05...0,15); реактивні, якщо всі ступені турбіни працюють зі ступенем реакції близько 0,5...0,6; комбіновані, у яких частина ступенів у ділянці високих тисків активні, а наступні ступені - реактивні.

2. За початковим тиском пари: турбіни м'ятої пари низького тиску 1,2 ... 2 ата, середнього тиску до 40 ата, високого тиску до 90 ата, підвищеного тиску до 130 ата, надвисокого до 240 ата, надкритичного - для тисків, вищих за критичний.

3. За характером перебігу теплового процесу:

– конденсаційні турбіни, що виконуються в даний час у більшості випадків для регенеративного підігріву живильної води нерегульований відбір пари. Основний потік пари у цих турбін розширюється до тиску 0,03...0,05 ата і надходить у конденсатор. Позначаються буквою "К".

– конденсаційні турбіни з регульованими відборами пари, що використовуються для забезпечення потреб споживачів тепла. Ці турбіни розрізняються за тиском у регульованих відборах. Турбіни, призначені для



забезпечення потреб теплофікації (опалення, вентиляції, гарячого водопостачання), характеризуються регульованим відлученням пари при 0,7... 1,2... 2,5 ата і позначаються буквою "Т";

– турбіни з регульованими відборами пари при 5... 10... 12 ата призначені для постачання теплом виробництва, вони позначаються буквою "П". Турбіни з двома регульованими відборами пари позначають літерами "ПТ".

– протитискові турбіни, що характеризуються різним кінцевим тиском, але вищим, ніж у конденсаційних. Пар після протитислової турбіни використовують для різних цілей, наприклад для теплофікації. У цьому випадку кінцевий тиск може бути нижчим за атмосферний (0,6...0,8 ата). Такі турбіни називають турбінами з погіршеним вакуумом. Велике поширення мають так звані "передвключені" турбіни з високими початковими параметрами пари. Відпрацьовану пару цих турбін за тиску 31...37 ата використовують у турбінах середнього тиску. Ці турбіни застосовують під час модернізації наявних установок.

Протитискні турбіни, після яких пару використовують для потреб виробництва, виготовляють із протитиском 1,2;3;5;10;15;18 ата. Протитискові турбіни позначаються буквою "Р".

Застосовують протитискові турбіни, що мають регульований відбір пари.

Турбіни м'ятої пари, що використовують для вироблення електричної енергії відпрацьовану пару молотів, пресів та інших парових машин; виготовляють і турбіни з підведенням м'ятої пари різних тисків до проміжних ступенів.

4. За числом ступенів: одноступінчасті з одним ступенем або одним диском і кількома ступенями швидкості; багатоступінчасті.

5. За напрямком руху пари під час розширення в проточній частині турбіни: аксіальні (під час руху пари паралельно осі обертання ротора); радіальні (під час руху пари перпендикулярно осі обертання ротора).

6. За кількістю і взаємним розташуванням циліндрів: одно-двох- і трициліндрові турбіни; одновальні - при послідовному розташуванні всіх

циліндрів на одному валу і багатовальні (двовальні) - при паралельному розташуванні.

7. За принципом регулювання: турбіни з дросельним регулюванням, сопловим, обвідним, комбінованим.

8. За швидкохідністю: турбіни зі зниженою швидкістю обертання (1000 і 1500 об/хв), з нормальною швидкістю обертання (біля 3000 об/хв), з підвищеною швидкістю обертання (від 5000 об/хв і вище); у разі з'єднання з електричним генератором останні потребують установа дорогих редукторів для зниження кількості обертів до нормальної; зі змінним числом обертів. Турбіни зі змінним числом обертів використовують на транспорті і для приводу виробничих машин.

9. За призначенням турбіни поділяють на стаціонарні, призначені для з'єднання з електричними генераторами, газо- і повітродувками; допоміжні, що застосовують для приводу машин власних потреб; нестаціонарні (транспортні турбіни).

Крім перерахованих ознак, можуть бути й інші, які повинні входити в характеристику турбіни.

У роботі використано парову одноступеневу активну турбіну типу "Т" як одну з найпростіших за конструктивним оформленням, експлуатацією, ремонтом, надійністю та економічністю (рис. 3.9).

Виходячи з робочої площі лопатки, що дорівнює  $2105,75 \text{ мм}^2$  (рис. 3.4), задаємося шириною лопатки  $t_l = 0,02 \text{ м}$  та її довжиною  $l_l = 0,1 \text{ м}$ . Відстань  $R$  від осі вала турбіни до центру лопатки вибираємо рівним  $0,1 \text{ м}$ .

У зв'язку з тим, що відбір пари в імітаційній паросилової установці для опалювальних цілей здійснюється перед турбіною, то, тиск пари на лопатку турбіни становив (рис. 3.3)  $3,43 \text{ атм} = 343 \cdot 10^3 \text{ Па}$ . Тоді, зусилля з боку пари на лопатку турбіни рівне

$$P_l = S_l \cdot 343 \cdot 10^3 = 0,02 \cdot 0,1 \cdot 343 \cdot 10^3 = 2 \cdot 1 \cdot 343 = 686 = H$$

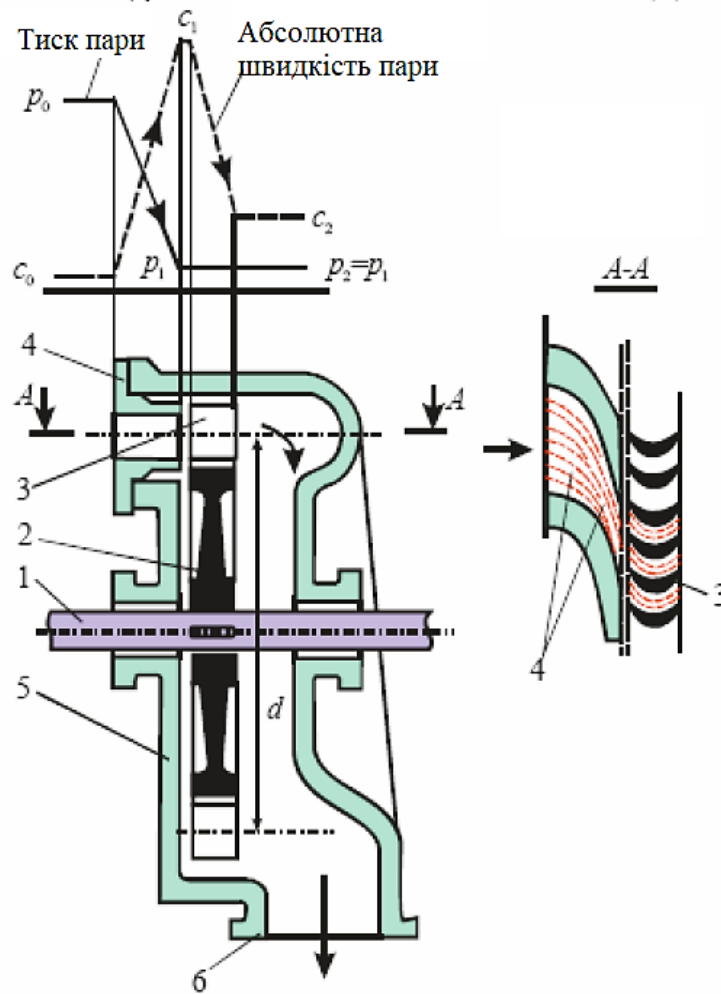


Рисунок 3.9 - Схема одноступеневої активної турбіни

1 - вал; 2 - диск; 5 - робочі лопатки; 4 - соплова решітка; 5 - корпус; 6 - випускний патрубок

Виходячи з того, що колесо турбіни обертається рівномірно, частота його обертання " $\omega_K$ " визначається з виразу

$$I_m = \frac{\omega_K^2}{2} = P_l \cdot R \quad (3.21)$$

де  $I_m = 473 \cdot 10^{-5} \text{ кгм}^2$  - сумарний момент обертання інерції обертових елементів самої турбіни і змонтованого на її валу електрогенератора.

$$473 \cdot 10^{-5} \cdot \omega_K^2 = 137,2$$

звідки,

$$\omega_K = 170_c^{-1}$$

Число обертів турбіни і, отже, електрогенератора рівне

$$\omega_K = \frac{\pi \cdot n_{турб}}{30} \cong 0,1 \cdot n_{турб} \quad (3.22)$$

$$n_{турб} \cong 10 \cdot \omega_K \cong 10 \cdot 170 = 1700 \frac{об}{хв}$$

Отриманий результат підтверджує теоретичні передумови.

Сила струму на клеммах генератора

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + \left(\omega \cdot L - \frac{1}{\omega \cdot C}\right)^2}}, 75 \quad (3.23)$$

де  $R = 8$  Ом - активний опір кола;

$\omega = 170$  рад/с - частота обертання якоря генератора;

$\omega_K \cdot L = 1$  Ом - індуктивний опір;

$\omega_K \cdot C = 0,00053$  Ом - ємнісний опір;

$U = 220$ В - необхідна напруга на клеммах генератора.

$$I = \frac{220}{\sqrt{64 + \left(170 \cdot 0,1 - \frac{1}{170 \cdot 0,00053}\right)^2}} \cong 22 \text{ A}$$

Таким чином, на клеммах генератора сила струму  $I=22$ А, а його напруга  $U=220$ В при активному опорі кола  $R=8$  Ом.

### 3.6 Висновки до розділу

1. У результаті проведених розрахунків встановлено параметри процесів горіння соломи та пароутворення.
2. Отримано розрахункові вихідні дані, необхідні для обґрунтування конструкції та параметрів парогенераторної установки і режимів її роботи

## 4 БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ

### 4.1 Блискавкозахист

Блискавкозахист — це система захисних пристроїв та заходів, що призначені для забезпечення безпеки людей, збереження будівель та споруд, устаткування та матеріалів від можливих вибухів, займань та руйнувань, спричинених блискавкою.

Блискавка — особливий вид проходження електричного струму через величезні повітряні прошарки, джерелом якого є атмосферний заряд, накопичений грозовою хмарою. Умови утворення таких хмар — велика вологість та швидка зміна температури повітря. За таких умов у атмосфері Землі проходять складні фізичні процеси, які призводять до утворення та накопичення електричних зарядів. При підвищенні напруженості електричного поля до критичних значень виникає розряд, який супроводжується яскравим свіченням (блискавкою) та звуком (громом). Довжина каналу блискавки може досягати кількох кілометрів, сила струму — 200 000 А, напруга— 150 000 кВ, а температура — 10000 °С і більше. Час існування блискавки 0,1 — 1 с. Щосекунди земну кулю уражають в середньому більше 100 блискавок [8].

Розрізняють первинні (прямий удар) і вторинні прояви блискавки.

Прямий удар блискавки (ураження блискавкою) — безпосередній контакт каналу блискавки з будівлею чи спорудою, що супроводжується протіканням через неї струму блискавки. Прямий удар блискавки здійснює на уражений об'єкт наступні дії: електричну, що пов'язана з ураженням людей і тварин електричним струмом та виникненням перенапруг на елементах, по яких струм відводиться в землю; теплову, що зумовлена значним виділенням теплоти на шляхах проходження струму блискавки через об'єкт; механічну, що спричинена ударною хвилею, яка поширюється від каналу блискавки, а також електродинамічними силами, що виникають у конструкціях, через які проходить струм блискавки.

Під вторинними проявами блискавки розуміють явища під час близьких розрядів блискавки, що супроводжуються появою потенціалів на конструкціях, трубопроводах, електропроводах всередині будівель і споруд, які не зазнали прямого удару блискавки. Вони виникають внаслідок електростатичної та електромагнітної індукції.

Електростатична індукція проявляється у наведені потенціалів на металевих елементах конструкції, в незамкнених металевих контурах, що може викликати іскріння всередині будівель та споруд і тим самим ініціювати пожежу чи вибух.

Електромагнітна індукція супроводжуються появою в просторі змінного магнітного поля, яке індукує в металевих контурах, що утворені із різних протяжних комунікацій (трубопроводів, електропроводів і т. п.) електрорушійну силу (ЕРС).

У замкнених контурах ЕРС призводить до появи наведених струмів. У контурах, в яких контакти недостатньо надійні в місцях з'єднання, такі струми можуть викликати іскріння або сильне нагрівання, що дуже небезпечно для приміщень, де утворюються вибухо- та (або) пожежонебезпечні концентрації.

Ще однією особливістю вторинного прояву блискавки є занесення високих потенціалів у будівлю по металоконструкціях, які підведені в цю будівлю (трубопроводах, рейкових шляхах, естакадах, проводах ліній електропередач і т. п.). Такі занесення супроводжуються електричними розрядами, які можуть стати джерелом вибуху чи пожежі.

Захист об'єктів від прямих ударів блискавки забезпечується шляхом встановлення блискавковідводів. Захист від електростатичної індукції (вторинний прояв блискавки) здійснюється приєднанням устаткування до заземлювача для відведення електростатичних зарядів, індукованих блискавкою, в землю. Захист від електромагнітної індукції полягає у встановленні методом зварювання перемичок між протяжними металоконструкціями в місцях їхнього зближення менше ніж на 10 см.. Інтервал між перемичками повинен становити не більше 20 м. Це дає змогу

наведеному струму блискавки переходити з одного контуру в інший без утворення електричних розрядів. Захист від занесення високих потенціалів у будівлю здійснюється шляхом приєднання до заземлювача металоконструкцій перед їх введенням у будівлю.

При виборі пристроїв блискавкозахисту за категоріями враховують важливість об'єкта, його висоту, місце розташування серед сусідніх об'єктів, рельєф місцевості, інтенсивність грозової діяльності. Останній параметр характеризується середньорічною тривалістю гроз у годинах для даної місцевості [9].

Таблиця 4.1 - Середня інтенсивність грозової діяльності у різних регіонах (областях) України

№ зп.	Регіони (області) України	Інтенсивність грозової діяльності, год/рік
1	Автономна Республіка Крим	40—60
2	Закарпатська, Запорізька, Донецька	80—100
3	Інші області України	60—80

Для захисту об'єкта від прямих ударів блискавки застосовують блискавковідвід — пристрій, який височіє над захищуваним об'єктом, сприймає удар блискавки та відводить її струм у землю. Захисна дія блискавковідводу базується на властивості блискавки уражати найбільш високі та добре заземлені металеві конструкції. За конструктивним виконанням блискавковідводи поділяються на стержневі, тросові та сітчасті, а за кількістю та загальною площею захисту — на одинарні, подвійні та багатократні. Окрім того, розрізняють блискавковідводи встановлені окремо та такі, що розташовані на захищуваному об'єкті. Будь-який блискавковідвід складається з блискавкоприймача (металевий стержень, трос, сітка), який безпосередньо

сприймає удар блискавки; несівної опори (спеціальні стовпи, елементи конструкцій будівлі), на якій розташовується блискавкоприймач; струмовідводу (металевий провідник, конструкція), по якому струм блискавки передається в землю; заземлювача, який забезпечує розтікання струму блискавки в землі.

Блискавковідвід характеризується зоною захисту — частиною простору, навколо блискавковідводу, яка захищена від прямих ударів блискавки з відповідним ступенем надійності.

Таблиця 4.2 - Середньорічна кількість ударів блискавки в 1 км<sup>2</sup> поверхні землі залежно від інтенсивності грозової діяльності

Середня інтенсивність грозової діяльності, год/рік	10–20	20–40	40–60	60–80	80–100	100 і більше
Середньорічна кількість ударів блискавки в 1 км <sup>2</sup> поверхні землі	1	2	4	5,5	7	8,5

#### **4.2 Особливості електротравматизму, електричний струм як чинник небезпеки**

Електротравми відбуваються при потраплянні людини під напругу в результаті доторкання до елементів електроустановки з різними потенціалами, чи потенціал яких відрізняється від потенціалу землі, в результаті утворення електричної дуги між елементами електроустановки безпосередньо, або між осінніми і людиною, яка має контакт з землею, а також в результаті дії напруги кроку.



Електротравматизм як соціальна категорія характеризується сукупністю електротравм за певний проміжок часу, їх абсолютними і відносними показниками, розподілом за тяжкістю, галузями виробництва.

Як попередньо зазначалось, електротравми в загальному виробничому травматизмі складають біля 1%, а в смертельному - біля 15-20%. Останнє свідчить про зміщення виду електротравм у бік тяжких, що є однією з особливостей електротравматизму.

Особливістю електротравматизму є також те, що на електроустановки напругою до 1 кВ припадає до 70-80% електротравм зі смертельними наслідками, а на електроустановки, пац тою понад 1 кВ, - до 20-30%.

Приведений розподіл електротравм за величиною напруги електроустановок обумовлюється не тільки більшою розповсюдженістю електроустановок напругою до 1 кВ, але, в більшій мірі, ще й тим, що такі установки доступні більшому загалу працівників, які мають недостатньо чіткі уявлення щодо небезпеки електричного струму та вимог безпеки при експлуатації електроустановок.

До установок, напругою понад 1 кВ, має доступ обмежена кількість працівників, які повинні мати достатній рівень підготовки з питань електробезпеки - відповідну вимогам чинних нормативів групу з електробезпеки [8,9].

Крім зазначеного, в порівнянні з іншими видами травматизму, електротравматизму характерні такі особливості:

- людина не в змозі дистанційно, без спеціальних приладів, визначити наявність напруги, а тому дія струму, зазвичай, є раптовою, і захисна реакція організму проявляється тільки після потрапляння під напругу;

- струм, що протікає через тіло людини, діє на тканини і органи не тільки в місцях контакту зі струмопровідними частинами і на шляху протікання, але й рефлекторно, як надзвичайно сильний подразник, впливає на весь організм, що може призводити до порушення функціонування життєво важливих систем організму — нервової, серцево-судинної систем, дихання, тощо;

– електротравм можливі без дотику людини до струмопровідних частин — внаслідок утворення електричної дуги при пробі повітряного проміжку між струмопровідними частинами, або між струмопровідними частинами і людиною, чи землею;

– розслідуванню, обліку і аналізу, в основному, доступні тяжкі електротравми та електротравми зі смертельними наслідками, що негативно впливає на профілактику електротравм.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. На сьогодні не існує вітчизняного автономного джерела енергії, що працює на соломі та відповідає сучасним досягненням науки і техніки, а також забезпечує безперебійну роботу споживача енергії як тепловою, так і електричною енергією.

2. Встановлено, що теплота згоряння соломи з вологістю 16÷18 % становить у середньому 16,3 МДж/кг, а її температура згоряння в середньому 950÷1050°C. При цьому її ентальпія (тепловміст) перебуває в межах 1100 ккал/кг, що дає змогу її використовувати для одержання пари та приводу генератора в паротурбінній установці.

3. Встановлено параметри парогенераторної установки: тип турбогенератора тип "Т"; активна одноступінчаста турбіна з числом обертів – 1700 об/хв ; лопатки турбіни - гіперболічної форми з робочою площею, що дорівнює 1610 мм<sup>2</sup>; напруга на клеммах генератора турбіни - 220 В; оптимальна витрата сухої пари на роботу турбогенератора - 0,0015 кг пари/с; оптимальний тиск сухої пари на лопатку турбіни -  $2,2 \cdot 10^5$  Па.

4. Встановлені параметри забезпечують такі характеристики парогенераторної установки: паропродуктивність котла - 70 кгпари/ год; тиск сухої пари в котлі - не менше  $5 \cdot 10^8$  Па; продуктивність по паливу (соломі) не менше 6,6 кг/год; габарити котла - 580x867x1135см; маса котла - 180 кг; корисна потужність котла - 16,3 кВт.

**ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ**

1. Коваль В. П. Енергетична ефективність систем позиціонування плоских сонячних панелей / В. П. Коваль, Р. Р. Івасечко, К. М. Козак // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – 2015. – № 3. – С. 2-10
2. Nikolaisen L., Nielsen C., Larsen M.G. Straw for Energy Production. Technology Environment - Economy. - Aarhus: EN- TRYK 2006. - 46 p.
3. Heat Production from Grain and Rape-straw in Schleswig-Holstein//Proc. of Europ. Workshop, Neumunser, Germany, 22-23 May, 2005. - Copenhagen: Energy Centre Деншарк, 2005. - 35 p.
4. Evald A., Larsen M.G. Experiences from 61 Straw-Fired District Heating Plants in Denmark/ /Ibid. - Vol. 1. - P. 211-216.
5. Jorgensen U, Kristensen E.F. European Energy Crops Overview. Country Report for Denmark, June 2006. - Copenhagen, 1996. - 83 p.
6. Галушак М.О. Курс фізики:підручник, у трьох книгах. Кн. 1. Механіка, молекулярна фізика і термодинаміка. - Івано-Франківськ, ІФНТУНГ, 2017, 428 с.
7. Б.Х. Драганов, А.А. Долінський, А.В. Міщенко, Є.М. Письменний. Теплотехніка: Підручник – Київ: «ІНКОС»., 2005. –504 с.
8. Гандзюк, М. П. Основи охорони праці [Текст] : підручник / М. П. Гандзюк, Є. П. Желібо, М. О. Халімовський ; за ред. М. П. Гандзюка ; МОН України. – 4-е видання. – К. : Каравела, 2008. – 384 с.
9. Купчик М.П., Гандзюк М.П , Степанець І Ф, Вендичанський В.Н., Литвиненко А.М., Іваненко. О. В. Основи охорони праці. - К.: Основа, 2000. - 416 с.