

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Гайдіна Альона Василівна

УДК 620.97

**МАШИНОБУДІВНЕ ПІДПРИЄМСТВО З РЕКУПЕРАЦІЄЮ ТЕПЛОТИ  
ВІДХІДНИХ ГАЗІВ ЛИВАРНОГО ЦЕХУ**

Спеціальність 101 – Екологія

Автореферат  
магістерської дисертації

Київ – 2018

Дисертацією є рукопис

Робота виконана у Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Міністерства освіти і науки України на кафедрі інженерної екології.

Науковий керівник – кандидат технічних наук, старший викладач,  
**Тверда Оксана Ярославівна,**  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут  
імені Ігоря Сікорського»

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Ливарне виробництво машинобудівного підприємства є значним споживачем енергоресурсів, необхідних для здійснення технологічних процесів, пов'язаних з високотемпературною дією на матеріали і супутніми процесами тепломасообміну.

Найбільш енергоємним в ливарному виробництві вважається процес плавлення металу, який супроводжується виділенням в атмосферу теплової енергії у вигляді високотемпературних димових газів. Втрати теплоти, окрім того що знижують ефективність роботи технологічного агрегату, провокують теплове забруднення атмосферного повітря.

Тому скорочення питомих енерговитрат та використання потенційних запасів вторинних енергоресурсів, шляхом утилізації теплоти відхідних газів плавильних агрегатів стає все більш актуальним завданням.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Магістерська дисертація виконана відповідно до Енергетичної стратегії України на період до 2035 року “Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність” (Розпорядження Кабінету Міністрів від 18 серпня 2017 р. № 605-р).

**Мета та задачі дослідження.** Метою магістерської роботи є виявлення можливості утилізації теплоти високотемпературних димових газів, що надходять від дугової сталеплавильної печі ливарного цеху.

Для досягнення сформульованої мети в дисертаційній роботі поставлено і вирішено наступні завдання:

- аналіз існуючих способів охолодження технологічних газів;
- обґрунтування доцільності застосування рекуперації теплоти відхідних газів для сталеплавильної ділянки, шляхом розрахунку матеріального та теплового балансів дугової печі;
- впровадження комплексної технологічної схеми рекуперації відхідних газів плавильної ділянки ливарного цеху;
- розроблення стартап-проекту.

*Об'єктом дослідження* є процес охолодження високотемпературних технологічних газів плавильної ділянки ливарного цеху машинобудівного підприємства.

*Предметом дослідження* є технологія рекуперації відхідних газів плавильного агрегату.

**Методи дослідження:** загальнонаукові методи аналізу і синтезу – при вивченні літературних даних, статистичні та аналітичні методи – при проведенні матеріального та теплового розрахунку дугової печі, методи математичної оптимізації для вибору типу рекуперативного обладнання, методи обробки інформації за допомогою програмного забезпечення – при розрахунку теплотехнічних параметрів рекуперативного обладнання .

**Наукова новизна одержаних результатів:** вперше встановлено залежність коефіцієнта теплопередачі пластинчастого рекуператора від

навантаження технологічного агрегату за допомогою інтерполяційного полінома Лагранжа 4-го степеня, залежність річних витрат при експлуатації теплообмінного обладнання від навантаження технологічного агрегату, залежність коефіцієнта теплопередачі пластинчастого рекуператора від витрати гарячого теплоносія за допомогою методу найменших квадратів.

**Практичне значення одержаних результатів полягає в тому що** впровадження технологічного рішення рекуперації теплоти високотемпературних газів плавильної ділянки ливарного цеху для використання теплоти газів в якості вторинних енергоресурсів дозволить зменшити витрати на теплоносії та знизити безпосередньо температуру викидів для попередження теплового забруднення атмосфери.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати роботи доповідалися на I Науково-технічній конференції магістрантів ІЕЕ (за результатами дисертаційних досліджень магістрантів).

**Публікації.** За результатами виконаних досліджень опубліковано статтю у збірнику матеріалів I Науково-технічної конференції магістрантів ІЕЕ.

**Структура і обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів і висновку, викладених на 100 сторінок машинописного тексту, у тому числі містить 8 рисунків, 39 таблиць, список використаних джерел із 61 найменувань.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність роботи і показано зв'язок із науковими програмами, сформульовано мету та основні задачі дослідження, наведено наукову новизну і практичну цінність результатів дослідження.

**Перший розділ** присвячено аналізу можливих способів охолодження технологічних газів, огляд описів до патентів на корисну модель, вивчення вітчизняного та закордонного досвіду утилізації високотемпературних газів.

Висока енергоємність процесу плавлення сталі при постійному зростанні цін на паливно-енергетичні ресурси ставить на одне з перших місць проблеми енергозбереження та пошуки шляхів зменшення матеріальних та теплових витрат виробництва. Тому, найбільш раціональним способом охолодження технологічних газів, перед викидом їх в атмосферу, вважається вторинне використання енергоресурсів – рекуперація відхідних газів з подальшим використанням тепла.

Аналіз вітчизняного та закордонного досвіду утилізації високотемпературних технологічних газів та описів до патентів на корисну модель показав, що існує необхідність удосконалення систем рекуперації, так як запропоновані технології не забезпечують ефективної утилізації високотемпературних газів та не здатні попередити температурні перепади теплоносія.

Виходячи з проведеного аналізу наукових та практичних досягнень і виявлених при цьому недоліків по даному напрямку, сформульовані наведені вище мета та основні задачі досліджень.

У другому розділі обґрунтовано доцільності застосування теплоти відхідних газів, шляхом оцінювання енергетичного режиму дугової електропечі та вибір способу вторинного використання енергоресурсів.

Визначення теплової ефективності дугової печі та кількісне відображення теплових потоків процесу плавлення сталі, здійснюється на основі аналізу теплового балансу. Складанню теплового балансу передують розрахунок матеріальних витрат, точність визначення яких впливає на кінцевий результат.

Розраховано матеріальний баланс для дугової сталеплавильної печі ДСП-50 на 50000 кг шихти під час процесу плавлення сталі марки 08 з масовим вмістом компонентів в шихті наведеним в табл. 1

Таблиця 1 – Хімічний склад шихтових матеріалів

Компоненти шихти	Маса, кг	Елемент								
		C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Fe
Лом	35000	140	105	105	17,5	17,5	70	35	35	34475
Чавун	10000	440	75	35	6	2			10	9432
Метал від попередньої плавки	5000	2,5	0,45	8,75	0,3	1,1	3	4,4	7,2	4972,3
Всього, кг	50000	582,5	180,5	148,8	23,8	20,6	73	39,4	52,2	48879,3
Всього, %	100	1,2	0,4	0,3	0,05	0,04	0,15	0,1	0,10	97,76

Згідно технологічних інструкцій виплавки сталей в електричних печах, процес складається з двох стадій: плавлення шихтових матеріалів та період окиснення – вирівнювання температури розплаву, видалення газів і неметалічних включень зі сплавів.

Розраховано, статті витрат та надходжень матеріального балансу процесу плавлення та окиснення, мають наступний вигляд (табл. 2).

Таблиця 2 – Матеріальний баланс для дугової печі ДСП-50

Витрачено, кг		Отримано, кг	
Металевий лом	35000	Метал	45830,857
Рідкий чавун	10000	Шлак	4538,0062
Метал, попередньої плавки	5000	Гази	2315,657
Вапно	1841	Пил в тому числі:	4057,986
Доломіт	300	$Fe_2O_3$	4053,127
Електроди	65	Ni	0,591
Повітря	220,8	$Cr_2O_3$	4,268
Газоподібний кисень	2896,6056		
Шлак попередньої плавки	698,229		
Сума	56021,6346	Сума	56742,506

На основі попередньо отриманих значень матеріальних витрат розраховано тепловий баланс дугової сталеплавильної печі ДСП-50 (табл. 3).

Основними складовими теплового балансу є кількість тепла, що надходить під час процесу плавлення сталі та технологічної теплоти, яка втрачається.

Таблиця 3 – Тепловий баланс для дугової печі ДСП-50

Надходження тепла	ГДж	%	Витрата тепла	ГДж	%
Електроенергія, $W_{ел}$	40,538	61,313	Корисна витрата енергії, $W_{к.ен}$	45,61	68,871
Теплота, що надходить з чавуном, $W_{чав}$	11,954	18,08	Втрати теплота з відхідними газами та частками $Fe_2O_3$ , $W_{відх.г} + W_{Fe_2O_3}$	11,795	17,810
Теплота, що вноситься вапном та доломітом, $W_{вапн} + W_{дол}$	0,035	0,053	Теплота ендотермічних реакцій, $W_{енд}$	6	9,06
Теплота екзотермічних реакцій, $W_{екз}$	9,982	15,097	Втрати теплоти з охолоджуючою водою, $W_{ох.в}$	0,869	1,312
Теплота шлакоутворення, $W_{шл}$	1,103	1,668	Втрати теплоти через теплопровідність футеровки печі, $W_{ф}$	1,951	2,946
Теплота від окиснення електродів, $W_{ок.ел}$	1,307	1,977			
Теплота, що вноситься повітрям і киснем, $W_{пов}$	1,198	1,812			
Сума	66,117	100	Сума	66,225	100

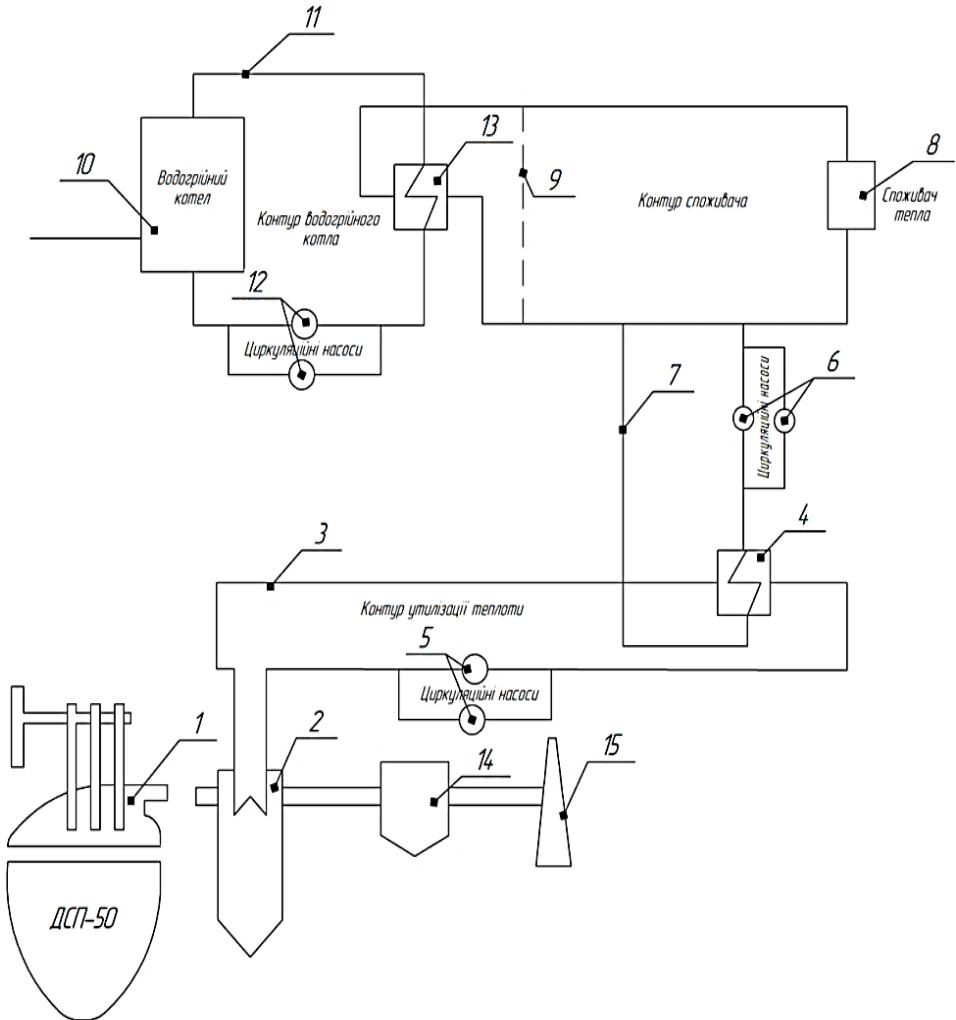
Аналіз теплового балансу роботи дугової сталеплавильної печі показує, що 18 % загальної витрати теплоти припадає на викиди разом з відхідних газами, що є досить високим показником витрати і свідчить про доцільність пошуку альтернативних шляхів повторного використання теплоти вторинних енергоресурсів.

Обрано, за допомогою методу ієрархії, альтернативу з екологічної та економічної точок зору, вторинного використання енергоресурсів – застосування рекуперативних (утилізаційних) установок для зовнішніх цілей підприємства (підігрів води, опалення приміщень).

**У третьому розділі** розроблено комплексну схеми рекуперації високотемпературних газів, з подальшим використанням теплоти споживачем – опалення приміщень, гаряче водопостачання, досліджено вплив початкових параметрів відхідних газів та витрати гарячого теплоносія на коефіцієнт теплопередачі теплообмінного агрегату.

Розробка технологічної схеми утилізації теплоти високотемпературних газів пропонується на базі плавильної ділянки, машинобудівного підприємства ПАТ «Сумське НВО», оснащеною дуговою сталеплавильною піччю марки ДСП-50.

Запропонована технологічна схема утилізації відхідних високотемпературних газів від плавильного агрегату наведена на рис. 1.



1 – дугова сталеплавильна піч ДСП-50; 2 – теплообмінник; 3 – контур утилізації теплоти; 4 – рекуперативний теплообмінник; 5 – циркуляційні насоси подачі охолодженої води; 6 – циркуляційні насоси подачі гарячого теплоносія; 7 – трубопровід подачі гарячого теплоносія; 8 – споживач тепла; 9 – розмежувальний контур; 10 – водогрійний котел; 11 – контур водогрійного котла; 12 – циркуляційні насоси контуру водогрійного котла; 13 – рекуперативний теплообмінник; 14 – газоочисне обладнання; 15 – димова труба

Рисунок 1 – Технологічна схема утилізації відхідних високотемпературних газів від плавильного агрегату ДСП-50

Основними завдання, що були поставлені перед новоствореною системою є ефективна утилізація високотемпературних газів та попередження температурних перепадів теплоносія, який надходить споживачеві, що зумовлюється періодичністю роботи плавильного агрегату.

Схема утилізації високотемпературних газів містить три замкнуті контури:

– утилізаційний контур, що утворюється з елементів охолодження конструкцій плавильної печі, трубопроводу подачі гарячого теплоносія споживачу, рекуперативного теплообмінника та циркуляційного насоса для зворотного забору охолодженої води;

– контур споживача теплоти, що складається з трубопроводу подачі гарячого теплоносія споживачу, циркуляційних насосів та додатково встановленого рекуперативного теплообмінника;

– до складу контуру водогрійного котла входить циркуляційний насос та водогрійний котел.

Охолодження відхідних газів здійснюється шляхом встановлення на шляху їх виходу рекуперативного теплообмінника з теплоносієм типу газ-вода, який забирає теплоту газів та передає рідкому теплоносію. Відхідні гази знижують температуру та надходять на очисну установку з подальшим видалення в атмосферу через димову трубу.

За допомогою циркуляційних насосів вода по утилізаційному контуру подається до теплообмінника і нагрівається до певної температури за рахунок отриманої теплоти відхідних газів.

Підігріта вода направляєється по контуру подачі гарячого теплоносія і надходить до рекуперативного теплообмінника, віддає тепло, за допомогою якого підігрівається теплоносій контуру споживача, охолоджена вода повертається на циркуляційні насоси, тим самим замикаючи контур.

Теплоносій контуру споживача циркуляційними насосами подається на рекуперативний теплообмінник і нагрівається водою утилізаційного контуру.

Після теплообмінника підігріта вода по розмежувальному контуру постачається споживачам тепла. В якості споживача в опалювальний осінньо-зимовий період виступають мережі теплопостачання виробничого цеху та водопостачання для господарських потреб, у весняно-літній період лише гаряче водопостачання.

У разі, якщо температура води контуру споживача є недостатньою, що фіксується датчиками температури, можливе додаткове нагрівання води до задовільної температури за допомогою водогрійного котла. Для цього утилізаційною схемою відхідних температурних газів передбачений додатковий контур, який спрацьовує у випадках нестабільної роботи плавильного агрегату: у разі технологічних порушень чи зменшенні продуктивності плавильного агрегату, що спричинить зниження температури відхідних газів і призведе до недостатньої кількості отримуваної теплоти.



До складу додаткового контуру входить існуючий на підприємстві водогрійний котел марки КСВа-1,0, який працює за рахунок спалювання природного газу та циркуляційний насос.

Вода контуру споживача надходить для догрівання до водогрійного контуру за допомогою циркуляційних насосів, догрівається до необхідної температури на водогрійному котлі і повертається в контур споживача.

Впровадження запропонованого технологічного рішення рекуперації теплоти високотемпературних газів плавильної ділянки ливарного цеху для використання теплоти газів в якості вторинних енергоресурсів, дозволить зменшити витрати на теплоносії (природний газ) та знизити безпосередньо температуру викидів для попередження теплового забруднення атмосфери.

Основними типами рекуперативних апаратів є: кожухотрубні теплообмінники, теплообмінники типу «труба в трубі», спіральні (змійовикові) теплообмінники, пластинчасті теплообмінники. Порівняння конструктивних характеристик обладнання наведена в табл.4.

Таблиця 4 – Порівняння конструктивних характеристик рекуперативного обладнання

Тип теплообмінного апарату	Компактність і металоемність		Відносна витрата металу на одиницю теплоти	Теплова ефективність, %
	Площа поверхні теплообміну на одиницю об'єму, м <sup>2</sup> /м <sup>3</sup>	Витрата металу на 1 м <sup>2</sup> площі теплообміну, кг/м <sup>2</sup>		
Пластинчасті	10-60	5-20	0,2	85-95
Кожухотрубні	18-40	38-80	1	70-80
Спіральні	34-72	30-50	0,2-0,9	70-80
Теплообмінники типу "труба в трубі"	4-15	175-200	1,5-3	65-70

Тому, для оптимального вибору теплообмінного апарату, за допомогою рішення оптимізаційної задачі було обрано тип теплообмінного обладнання – пластинчастий теплообмінник, за умови цільової функції представленої мінімальним значенням металоемності та значенням теплової ефективності 85 % – 95 %. Головним елементом теплообмінника є пластини, які призначені для передачі теплової енергії одного теплоносія іншому. Вони виготовляються з інертних матеріалів, стійких до корозії та високих температур.

Під час проектування нових схем теплообмінних апаратів, необхідно провести тепловий розрахунок, кінцевою метою якого, є визначення розмірів поверхні теплообміну, що забезпечує необхідну теплопродуктивність при заданих температурах і витратах робочих середовищ

Так як, кожен з трьох замкнутих контурів на технологічній схемі утилізації відхідних високотемпературних газів від плавильного агрегату ДСП-50 (рис. 1) містить теплообмінний апарат, існує необхідність в розрахунку кожного контуру

окремо, задля визначення теплотехнічних показників утилізаційного обладнання та кінцевої робочої температури, що надходить споживачеві.

На основі рівняння теплопередачі та теплового балансу, визначено теплотехнічні показники для теплообмінного апарату типу повітря-вода утилізаційного контуру, згідно яких обрано тип теплообмінного обладнання з поверхнею теплообміну  $31,5 \text{ м}^2$ , поверхнею пластин  $f = 0,6 \text{ м}^2$  та кількістю пластин  $n = 56$ . До утилізаційного контуру з робочого простору плавильної печі надходять відхідні гази з температурою  $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ , охолоджуються за допомогою утилізаційного контуру до  $150 \text{ }^\circ\text{C}$ , а рідкий теплоносій який надходить до теплообмінного обладнання нагрівається з  $40 \text{ }^\circ\text{C}$  до  $152 \text{ }^\circ\text{C}$ . Коефіцієнт корисної дії при застосуванні даного теплообмінника для утилізаційного контуру складатиме.  $89 \%$ .

За допомогою програмного забезпечення «CAS-200» розраховано за теплообмінний пристрій типу вода-вода контуру споживача згідно чого, розрахункова поверхня теплообміну –  $7,04 \text{ м}^2$ , кількість пластин, що входять до складу пакетів пластинчастого рекуператора – 32, потужність апарату, яка необхідна для ефективної роботи –  $585,9 \text{ кВт}$ . Рідкий теплоносій з утилізаційного контуру надходить до контуру споживача, де охолоджується до  $40 \text{ }^\circ\text{C}$ , замикає контур і повертається до утилізаційного контуру. За допомогою теплоти гарячого теплоносія нагрівається холодний теплоносій контуру споживача з  $30 \text{ }^\circ\text{C}$  до  $110 \text{ }^\circ\text{C}$  і надходить безпосередньо до споживача. Коефіцієнт корисної дії при застосуванні даного теплообмінника для контуру споживача складатиме.  $85 \%$ .

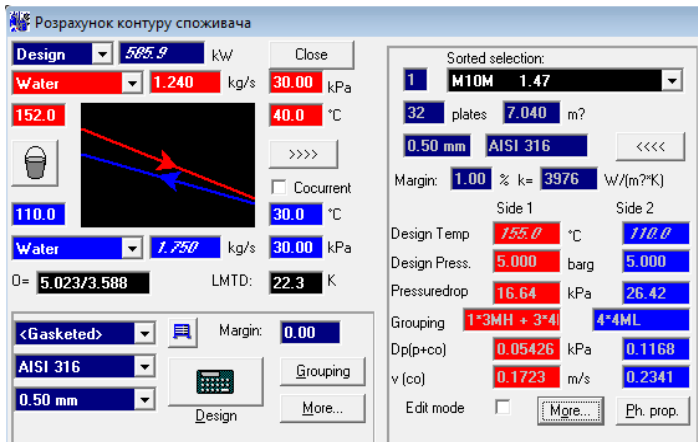


Рисунок 2 – Розрахунок параметрів теплообмінного пристрою в програмному середовищі «CAS-200»

Теплообмінний апарат для водогрійного контуру приймаємо, з такими ж попередньо розрахованими теплотехнічними параметрами та потужністю, так як робота контуру планується лише при аварійних роботах та технологічних змінах

режиму роботи плавильного агрегату і передбачити вихідні температури теплоносіїв на даному етапі неможливо.

Основним критерієм оцінки ефективності теплообмінних пристроїв та інтенсивності проходження технологічного процесу є коефіцієнт теплопередачі.

Тому, на основі експериментальних даних представлених в роботі, як впливає на коефіцієнт теплопередачі режим роботи плавильної печі, тобто навантаженість технологічного агрегату. В якості показника, що характеризує навантаженість устаткування виступає швидкість надходження димових газів до пластинчастого рекуператора, виражена в м/с.

За допомогою інтерполяційного полінома Лагранжа, визначено, що залежність коефіцієнта теплопередачі пластинчастого рекуператора від навантаження технологічного агрегату (рис. 3):

$$L(W) = 0,0053 \cdot W^4 - 0,2147 \cdot W^3 + 2,9887 \cdot W^2 - 13,992 \cdot W + 64,467.$$

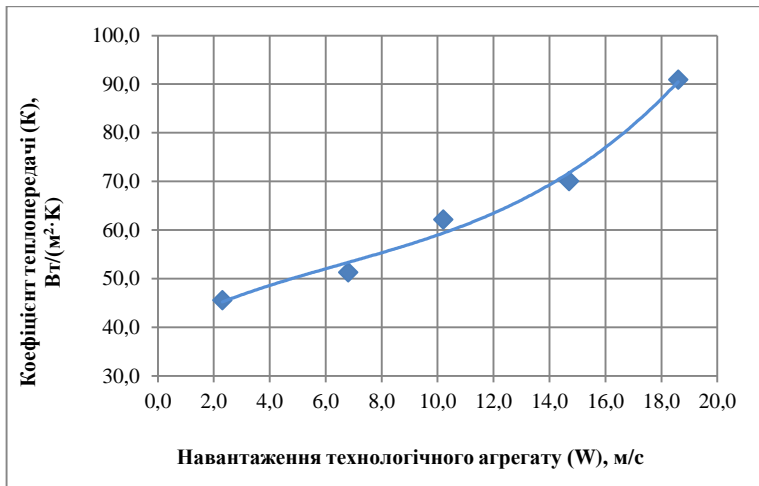


Рисунок 3 – Залежність коефіцієнта теплопередачі пластинчастого рекуператора від навантаження технологічного агрегату

Аналізуючи графік спостерігаємо, що при збільшенні швидкості відхідних газів плавильного агрегату коефіцієнт теплопередачі пластинчастого рекуператора зростає.

Відповідно до рівняння теплопередачі коефіцієнт теплопередачі відноситься обернено пропорційно до площі теплообміну, то зі зростанням швидкостей буде зростати коефіцієнт теплопередачі, і як наслідок зменшуватися розміри площі теплообміну. При цьому буде зменшуватися показник металоемності, який вплине на капітальні витрати поверхні теплообміну – вартість теплообмінника та амортизаційні відрахування.

На основі формули річних експлуатаційних витрат розраховано річні витрати при зміні площі теплообміну.

Згідно отриманих результатів, встановлено залежність річних витрат при експлуатації теплообмінного обладнання від навантаженості технологічного агрегату, тобто швидкості надходження димових газів до пластинчастого рекуператора (рис. 4):

$$\Pi = -0,0043 \cdot W^3 + 0,1486 \cdot W^2 - 6,4498 \cdot W + 876,24.$$

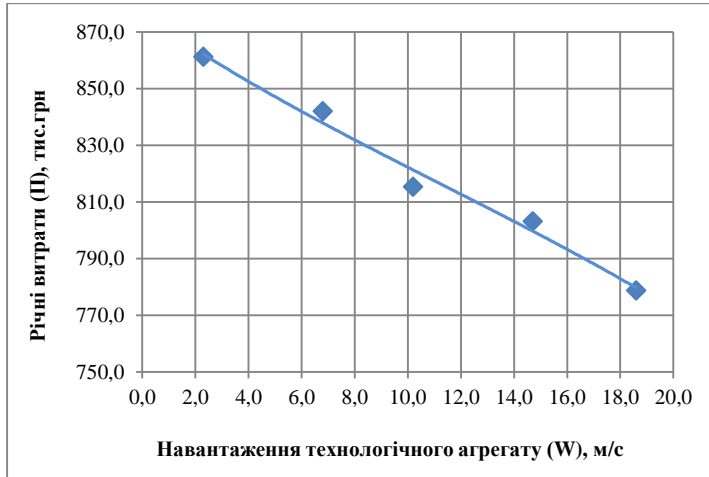


Рисунок 4 – Залежність річних витрат при експлуатації теплообмінного обладнання від навантаження технологічного агрегату

Згідно графіку, спостерігаємо, що збільшення швидкості надходження димових газів до пластинчастого рекуператора призводить до зменшення річних витрат на експлуатацію обладнання.

Для теплообмінних присторіїв типу вода-вода, на основі експериментальних даних, наведених в роботі, було досліджено залежність коефіцієнта теплопередачі в пластинчастому рекуператорі від витрати гріючого теплоносія – води.

Таким чином залежність коефіцієнта теплопередачі пластинчастого рекуператора від витрати гріючого теплоносія описується виразом (рис.5):

$$K = 0,2178 \cdot V^3 - 1,484 \cdot V^2 + 3,533 \cdot V + 0,9728.$$

Отже, при збільшенні витрати гарячого теплоносія, коефіцієнт теплопередачі рекуперативного обладнання пропорційно зростає, а відповідно показники ефективності роботи теплообмінника також збільшуються

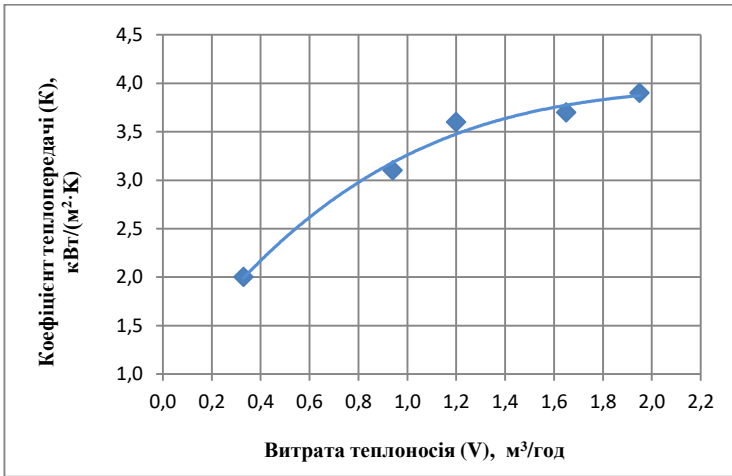


Рисунок 5 – Залежність коефіцієнта теплопередачі пластинчастого рекуператора від витрати гарячого теплоносія

У четвертому розділі проведено маркетинговий аналіз для впровадження розробленої технології на ринок: формулювання ідеї проекту, визначення основної групи споживачів, формування можливостей та загроз пропонованої технології.

Сформульовано основну ідею проекту, що пропонується, напрямки для можливого застосування, вигоди, які може отримати користувач (табл. 5)

Таблиця 5 – Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Комплексна технологічна система утилізації високотемпературних відхідних газів плавильної ділянки ливарного цеху	Можливість застосування рекуперованої теплоти на потреби теплопостачання виробничих приміщень	Отримання теплоти за меншу собівартість
		Зменшення викидів в навколишнє середовище через відсутність процесу спалювання природного газу
	Можливість застосування рекуперованої теплоти для господарських потреб гарячого водопостачання	Відсутність витрат за екологічні податки забруднюючих речовин, що викидаються разом з продуктами
		Попередження теплового забруднення атмосфери за рахунок рекуперації газів

Визначено основну групи споживачів – аналогічні підприємства ливарної промисловості, від технологічних агрегатів яких надходять високотемпературні гази, в якості факторів конкурентоспроможності обрано: виробничо-технологічний потенціал, оптимальна технологія виробництва, рівень обслуговування, задоволення потреб споживача.

Встановлено основні можливості та загрози для пропонованої технології на ринку споживачів за допомогою формування SWOT-аналіз, за альтернативу ринкового впровадження стартап-проекту (табл.6).

Таблиця 6 – SWOT- аналіз стартап-проекту

Сильні сторони	Слабкі сторони
<ul style="list-style-type: none"> <li>– покращення екологічної ситуації підприємств;</li> <li>– досягнення економічної вигоди;</li> <li>– низька концентрація виробників теплообмінного обладнання на ринку;</li> <li>– наявність сертифікату якості ISO;</li> <li>– супровід проекту на всіх етапах реалізації</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– відсутність попереднього досвіду в розробці аналогічних технологічних систем;</li> <li>– залежність від постачальників розхідних матеріалів</li> </ul>
Можливості	Загрози
<ul style="list-style-type: none"> <li>– проникнення на нові сегменти як закордонного так і вітчизняного ринку;</li> <li>– удосконалення запропонованої системи, шляхом розширення можливостей використання теплоти відхідних газів для виробництва електроенергії та потреб суміжних технологічних дільниць;</li> <li>– зменшення собівартості продукції за рахунок використання новітніх технологій та розробок;</li> <li>– нарощення виробничих потужностей;</li> <li>– збільшення рентабельності продукції за рахунок зменшення її собівартості</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– виникнення монополістичної конкуренції;</li> <li>– нерегульованість питань ціноутворення, через створення олігополістичних груп ;</li> <li>– відсутність або нестача коштів на реалізацію проекту;</li> <li>– невідповідність умовам сертифікації або/та патентування, технічним регламентам підприємств;</li> <li>– швидка зміна потреб споживача</li> </ul>

Задля наочності отриманої еколого-економічної вигоди від запровадження комплексної системи для підприємств ливарної промисловості наведемо розрахунки можливої економії під час відмови від традиційних джерел отримання теплоти – газової котельні і перехід на використання вторинних енергетичних ресурсів – рекуперації теплоти високотемпературних відхідних газів, на прикладі ливарної ділянки ПАТ «Сумське НВО».

З урахування орієнтовної вартості обладнання 750 тис. грн., термін окупності системи для підприємств складає 11 місяців, що досягається за рахунок економії під час відмови від традиційних джерел отримання теплоти – газової котельні і перехід на використання вторинних енергетичних ресурсів – рекуперації теплоти високотемпературних відхідних газів та відсутності витрат на екологічні податки. Отриманий показник терміну окупності свідчить про рентабельність інвестицій.

## ВИСНОВКИ

Дисертація є закінченою науково дослідною роботою, в якій вирішена актуальна науково-практична задача, що полягає обґрунтуванню можливості утилізації теплоти високотемпературних димових газів, що надходять від дугової сталеплавильної печі ливарного цеху та розробці комплексної системи рекуперації високотемпературних димових газів з подальшим використанням теплоти .

Основні наукові і практичні результати роботи полягають в наступному.

1. Проаналізовано основні підходи до вирішення проблеми охолодження технологічних газів, визначено, що найбільш раціональним способом охолодження технологічних газів, перед викидом їх в атмосферу є вторинне використання енергоресурсів.

2. Визначено, що згідно теплового балансу з відхідними газами дугової сталеплавильної печі втрачається 18 % загальної витрати теплоти, що свідчить про доцільність пошуку альтернативних шляхів утилізації теплоти відхідних газів плавильної ділянки ливарного цеху.

3. Обрано, за допомогою методу ієрархій, альтернативу з екологічної та економічної точок зору, вторинного використання енергоресурсів – застосування рекуперативних (утилізаційних) установок для зовнішніх цілей (підігрів води, опалення приміщень).

4. Розроблено комплексну систему рекуперації високотемпературних газів з подальшим використанням теплоти споживачем – опалення приміщень, гаряче водопостачання.

5. Обрано на основі рішення задачі оптимізації тип теплообмінного обладнання за умови цільової функції представленої мінімальним значенням металоємності та значенням теплової ефективності 85 % – 95 % – пластинчастий теплообмінний апарат.

6. Визначено теплотехнічні показники для теплообмінного апарату типу повітря-вода утилізаційного контуру, згідно яких обрано тип теплообмінного обладнання з поверхнею теплообміну  $31,5 \text{ м}^2$ , поверхнею пластин  $f = 0,6 \text{ м}^2$  та кількістю пластин  $n = 56$ . Коефіцієнт корисної дії – 89 %.

7. Розраховано за допомогою програмного забезпечення «CAS-200» теплообмінний пристрій типу вода-вода контуру споживача згідно чого, розрахункова поверхня теплообміну –  $7,04 \text{ м}^2$ , кількість пластин, що входять до складу пакетів пластинчастого рекуператора – 32, потужність апарату, яка необхідна для ефективної роботи – 585,9 кВт. Коефіцієнт корисної дії – 85 %.

8. Отримано значення температури відхідних газів на виході з технологічної схеми рекуперації – 150 °С, температура води, що надходить до кінцевого споживача – 110 °С.

9. Встановлено залежність коефіцієнта теплопередачі пластинчастого рекуператора від навантаження технологічного агрегату, залежність річних витрат при експлуатації теплообмінного обладнання від навантаження технологічного агрегату, залежність коефіцієнта теплопередачі пластинчастого рекуператора від витрати гарячого теплоносія .

10. Сформульовано ідею стартап-проекту, визначено основну групи споживачів продукту – аналогічні підприємства ливарної промисловості, від технологічних агрегатів яких надходять високотемпературні гази.

11. Встановлено основні можливості та загрози для запропонованої технології на ринку споживачів за допомогою формування SWOT- аналізу.

12. З урахування орієнтовної вартості обладнання 750 тис. грн., термін окупності системи для підприємств складає 11 місяців, що досягається за рахунок

економії під час відмови від традиційних джерел отримання теплоти – газової котельні. Отриманий показник терміну окупності свідчить про рентабельність інвестицій.

### **Основні положення і результати дисертації опубліковані у роботах:**

*Тези доповідей на науково-практичних конференціях:*

1. Гайдіна А.В. Рекуперация теплоты відхідних газів. Наукові праці КПІ ім. Ігоря Сікорського, ІЕЕ.: збірник тез доповідей I науково-технічної конференції магістрантів ІЕЕ. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, ІЕЕ, 2018. 48 с.

### **АНОТАЦІЯ**

Магістерська дисертація присвячена обґрунтуванню можливості утилізації теплоти високотемпературних димових газів, що надходять від дугової сталеплавильної печі ливарного цеху та розробці комплексної системи рекуператії високотемпературних димових газів з подальшим використанням теплоти споживачем – опалення приміщень, гаряче водопостачання.

В роботі встановлено залежність коефіцієнта теплопередачі пластинчастого рекуператора від навантаження технологічного агрегату за допомогою інтерполяційного полінома Лагранжа 4-го степеня, залежність річних витрат при експлуатації теплообмінного обладнання від навантаження технологічного агрегату, залежність коефіцієнта теплопередачі пластинчастого рекуператора від витрати гарячого теплоносія за допомогою методу найменших квадратів.

Розроблено стартап-проект на базі запропонованої технології. Визначено, що термін окупності комплексної системи рекуператії високотемпературних димових газів для підприємств ливарної промисловості, з урахування орієнтовної вартості обладнання 750 тис. грн., складає 11 місяців, що досягається за рахунок економії під час відмови від традиційних джерел отримання теплоти – газової котельні і перехід на використання вторинних енергетичних ресурсів – рекуператії теплоти високотемпературних відхідних газів та відсутності витрат на екологічні податки. Отриманий показник терміну окупності свідчить про рентабельність інвестицій.

**Ключові слова:** теплообмінні апарати, втрати теплоти, технологічні гази, дугова сталеплавильна піч, коефіцієнт теплопередачі, ефективність рекуператії.

### **АНОТАЦІЯ**

Магистерская диссертация посвящена обоснованию возможности утилизации теплоты високотемпературных димовых газов, поступающих от



дуговой сталеплавильной печи литейного цеха и разработке комплексной системы рекуперации высокотемпературных дымовых газов с последующим использованием теплоты потребителем – отопление помещений, горячее водоснабжение.

В работе установлена зависимость коэффициента теплопередачи пластинчатого рекуператора от нагрузки технологического агрегата с помощью интерполяционного полинома Лагранжа 4-й степени, зависимость годовых затрат при эксплуатации теплообменного оборудования от нагрузки технологического агрегата, зависимость коэффициента теплопередачи пластинчатого рекуператора от расхода горячего теплоносителя с помощью метода наименьших квадратов.

Разработан стартап-проект на базе предлагаемой технологии. Определено, что срок окупаемости комплексной системы рекуперации высокотемпературных дымовых газов для предприятий литейной промышленности, с учетом ориентировочной стоимости оборудования 750 тыс. грн, составляет 11 месяцев, достигается за счет экономии при отказе от традиционных источников получения тепла - газовой котельной и переход на использование вторичных энергетических ресурсов - рекуперации теплоты высокотемпературных отходящих газов и отсутствия затрат на экологические налоги. Полученный показатель срока окупаемости свидетельствует о рентабельности инвестиций.

**Ключевые слова:** теплообменные аппараты, потери теплоты, технологические газы, дуговая сталеплавильная печь, коэффициент теплопередачи, эффективность рекуперации.

## ANNOTATION

The master's dissertation is devoted to the substantiation of the possibility of utilizing the heat of high-temperature flue gases coming from an arc furnace smelting furnace of a foundry shop and the development of a complex system for the recovery of high-temperature flue gases with the subsequent use of heat by the consumer - heating of premises, hot water supply.

In the work, the dependence of the heat transfer coefficient of the plate-type recuperator on the load of the technological unit with the aid of a 4-degree Lagrange interpolation polynomial is established, the dependence of annual costs on the operation of the heat-exchange equipment from the loading of the technological unit, and the dependence of the heat transfer coefficient of the plate heat recovery on the heat carrier flow using the method of least squares.

A startup project based on the proposed technology has been developed. It is determined that the payback period of the complex system of high-temperature flue gas recuperation for enterprises of the foundry industry, taking into account the estimated cost of equipment, is UAH 750 thousand, is 11 months, which is achieved through saving during the rejection of traditional sources of heat supply - a gas boiler house and a transition to the use of secondary energy resources - the recovery of heat from high-temperature waste gases and the lack of environmental taxes. The resulting payback period reflects the return on investment.

**Key words:** heat exchangers, heat losses, technological gases, arc furnace, heat transfer coefficient, efficiency of recovery.

Гайдіна Альона Василівна

**Машинобудівне підприємство з рекуперацією теплоти відхідних газів  
ливарного цеху**

101 – Екологія

(Автореферат)

