

Центральноукраїнський національний технічний університет  
Механіко-технологічний факультет  
Кафедра матеріалознавства та ливарного виробництва

«Допущено до захисту»  
Зав. кафедри МЛВ  
канд. техн. наук, доцент  
\_\_\_\_\_ Олександр КУЗИК  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

## **КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

**за першим (бакалаврським) рівнем вищої освіти на тему:**

**"Конструювання і розрахунок газової вагранки  
ємністю 10 т/год."**

Виконав здобувач вищої освіти  
IV курсу, групи ПМ-23мб-1  
спеціальності 131  
«Прикладна механіка»  
\_\_\_\_\_ Святослав ШЕВЧУК  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

Керівник бакалаврської роботи  
Старший викладач  
\_\_\_\_\_ Микола БОСИЙ  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

Рецензент  
канд. техн. наук, доцент  
\_\_\_\_\_ Любов ОЛІЙНІЧЕНКО  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

**Центральноукраїнський національний технічний університет**

Факультет: механіко-технологічний

Кафедра: матеріалознавства та ливарного виробництва

Рівень вищої освіти: перший (бакалаврський)

Галузь знань: 13 «Механічна інженерія»

Спеціальність: 131 «Прикладна механіка»

Освітньо-професійна програма: «Комп'ютерний інжиніринг технологій, робототехніка і 3D друк»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедри МЛІВ

канд. техн. наук, доцент

\_\_\_\_\_ Олександр КУЗИК

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

**ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ  
ЗА ПЕРШИМ (БАКАЛАВРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ  
ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ  
Шевчука Святослава Ігоровича**

1. Тема роботи: Конструювання і розрахунок газової вагранки ємністю 10 т/год.
2. Керівник роботи: Старший викладач Босий Микола Вікторович
3. Строк подання роботи до захисту
4. Мета та завдання кваліфікаційної роботи: вивчення конструкції роботи газової вагранки та розрахувати основні її розміри. Визначити матеріальний і тепловий баланси проектного обладнання.

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№ з/п	Назва етапів випускної кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Опрацювання навчальної та наукової літератури		
2	Проведення розрахунку основних розмірів, матеріальний та тепловий баланси проектного обладнання, обробка фактичного матеріалу		

3	Написання першого варіанта тексту, подання його на ознайомлення керівнику		
4	Усунення недоліків, написання останнього варіанта тексту		
5	Перевірка роботи на плагіат		
6	Зовнішнє рецензування роботи		
7	Захист випускної кваліфікаційної роботи на засіданні екзаменаційної комісії		

Дата видачі завдання

«\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

Підпис керівника

\_\_\_\_\_ Микола БОСИЙ

Завдання прийнято до виконання

«\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

Підпис здобувача

\_\_\_\_\_ Святослав ШЕВЧУК

## АНОТАЦІЯ

Шевчук С.І. "Конструювання і розрахунок газової вагранки ємністю 10 т/год.", спеціальність 131 «Прикладна механіка», ОПП – «Комп'ютерний інжиніринг технологій, робототехніка і 3D друк», Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, 2026. 34 с. Матеріали ілюстрації 2 іл.

Мета кваліфікаційної бакалаврської роботи полягає у проектуванні газової вагранки продуктивністю 10 т/год, що включає обґрунтування її геометричних розмірів, а також розрахунок матеріального та теплового балансів.

Проектні роботи охоплюють розрахунок плавильної установки та визначення робочих параметрів.

Графічна частина газової вагранки – загальний вигляд.

**Газова вагранка, природний газ, чавун, матеріальний баланс, тепловий баланс**

## **ABSTRACT**

Shevchuk S.I. "Design and calculation of a gas cupola with a capacity of 10 t/h.", specialty 131 "Applied Mechanics", OPP – "Computer engineering technologies, robotics and 3D printing", Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, 2026. 34 p. Illustration materials 2 ill.

The purpose of the qualifying bachelor's thesis is to design a gas cupola furnace with a capacity of 10 t/h, which includes the justification of its geometric dimensions, as well as the calculation of material and heat balances.

The design work includes the calculation of the melting plant and the determination of operating parameters.

The graphic part of the recuperative cupola – general view.

**Gas cupola, natural gas, cast iron, material balance, heat balance**

## Зміст

Вступ.....	7
РОЗДІЛ 1. Устрій і робота вагранки .....	9
РОЗДІЛ 2. Повний розрахунок вагранки .....	11
2.1. Розрахунок розмірів вагранки.....	11
2.2. Плавка чавуну в газових вагранках .....	13
РОЗДІЛ 3. Матеріальний баланс .....	15
РОЗДІЛ 4. Тепловий баланс .....	17
РОЗДІЛ 5. Розрахунок горіння палива.....	21
5.1. Розрахунок горіння природного газу .....	21
РОЗДІЛ 6. Розрахунок пальника для спалювання природного газу .....	24
Висновки.....	30
Література .....	31
Додатки .....	32
Додаток 1. Загальний вид вагранки.....	33

## Вступ

Високопродуктивна газова вагранка є ефективним обладнанням для переплаву чавуну, яке вирізняється компактністю та не потребує значних трудових ресурсів для обслуговування. Можливість повної автоматизації процесів регулювання, простота конструкції, а також безперервний процес модернізації роблять цей агрегат перспективним для ливарного виробництва.

Сучасні вагранки походять від похилої шахтної печі 1774 року, яка поєднувала принципи тигельного та шахтного плавлення. Метал випускали через отвір, а для повного спорожнення нахилили весь агрегат. Удосконалення конструкції призвело до появи циліндричних обертових печей, а згодом — до стаціонарних шахтних печей із фурмами, закріплених на фундаменті. Спочатку у вагранки подавалось дуття високого тиску від повітродувок доменних печей. Після того, як замість дуття високого тиску стали застосовувати дуття низького тиску та збільшили число фурм, з'явилась можливість відкривати та закривати льотку під час роботи вагранки та працювати на ній безперервно більш або менш тривалий час. Одночасно була зменшена витрата пального, яке при старому способі складало до 100 % від ваги металу. Завантаження шихти та палива у вагранку спочатку відбувалось зверху крізь відкритий колошник, як в доменних печах того часу. Для уловлювання продуктів горіння та іскр, які вилітають з вагранки, над ними приладнували витяжні зонти у вигляді купола.

За цією ознакою на основних західно-європейських мовах вагранка має однакову назву, яку можна перекласти як “купольна піч”.

В 60-х роках минулого століття вагранка була піднята над фундаментом на колонах і до неї був прибудований передній горн або копильник для чавуну. Однак, ще в 1901 році описана вагранка, яка стоїть на суцільному фундаменті. Багаточисленні зміни одержала конструкція фурм вагранок. Будувались вагранки з одним та декількома рядами фурм. Пропонувалась конструкція вагранок, в яких замість окремих фурм робилась

суцільна щілина по всьому колу вагранки з фурмою, розміщеною в центрі поду та з фурмами, розміщеними майже по всій висоті шахти.

Сьогодні найпоширенішими є вагранки з круглим перерізом, які комплектуються копильником залежно від потреби. Доцільність використання копильника визначається специфікою виробничого процесу. Вагранки без копильника є типовими для масових потокових ліній, де потрібна безперервна видача металу. Моделі з копильником більше підходять для індивідуального та серійного ливарного виробництва.

Вибір вогнетривів для плавильного поясу визначається хімічною природою шлаку. Якщо утворюються кислі шлаки, футеровку роблять із кварциту або шамоту, тоді як для основних шлаків використовують магнезит.

## РОЗДІЛ 1. УСТРІЙ І РОБОТА ВАГРАНКИ [1-6]

Конструктивні особливості газових вагранок зумовлені прагненням застосувати газоподібні енергоносії для плавки чавуну. У таких агрегатах як паливо використовують природний або інші горючі гази, які спалюються у спеціальних тунелях, розміщених по периметру печі вище фурм.

В газових вагранках порівняно легко розплавити метал, але значно важче перегріти його до необхідної температури. Спроби відтворити в газовій вагранці умови перегріву металу, які є в коксовій вагранці, поки не дали позитивних результатів. Газові вагранки з керамічною холостою колошою дозволяють одержати гарячий рідкий чавун, але збільшений угар кремнію марганцю і, особливо, вуглецю вимагає застосування шихти більшої вартості, тому вартість чавуну, який виплавляється в газовій вагранці значно вище вартості чавуну із звичайної коксової вагранки.

У газову вагранку шихта завантажується через вікно. В нижній частині шахти розташовані пальники. Газ спалюється у вогнетривких тунелях. Продукти горіння спочатку потрапляють на керамічну колошу і потім підіймаються, стикаючись з шихтою, яка нагрівається. Висоту розташування пальників над фурмами вибирають, дивлячись на те, щоб продукти горіння виходили нижче верхнього рівня холостої колоші шахти вагранки на 250-300 мм. Таким чином, якщо в газовій вагранці виплавляють сірий чавун, а висота холостої колоші над віссю фурм, то вісь пальників повинна бути вище вісі фурм на 900-950 мм, а якщо виплавляють білий чавун, то висота горілок має бути вище на 300-350 мм.

Розплавлений метал стікає між кусків колоші та перегрівається при цьому.

Гарячий метал з шахти вагранки стікає в копильник. Для обігріву копильника є горілка. Рідкий метал в копильнику практично не перегрівається, тому що на його поверхні завжди є шар шлаку [ 1-5 ].

Випускання металу з вагранки відбувається періодично по жолобу (рис. 1).

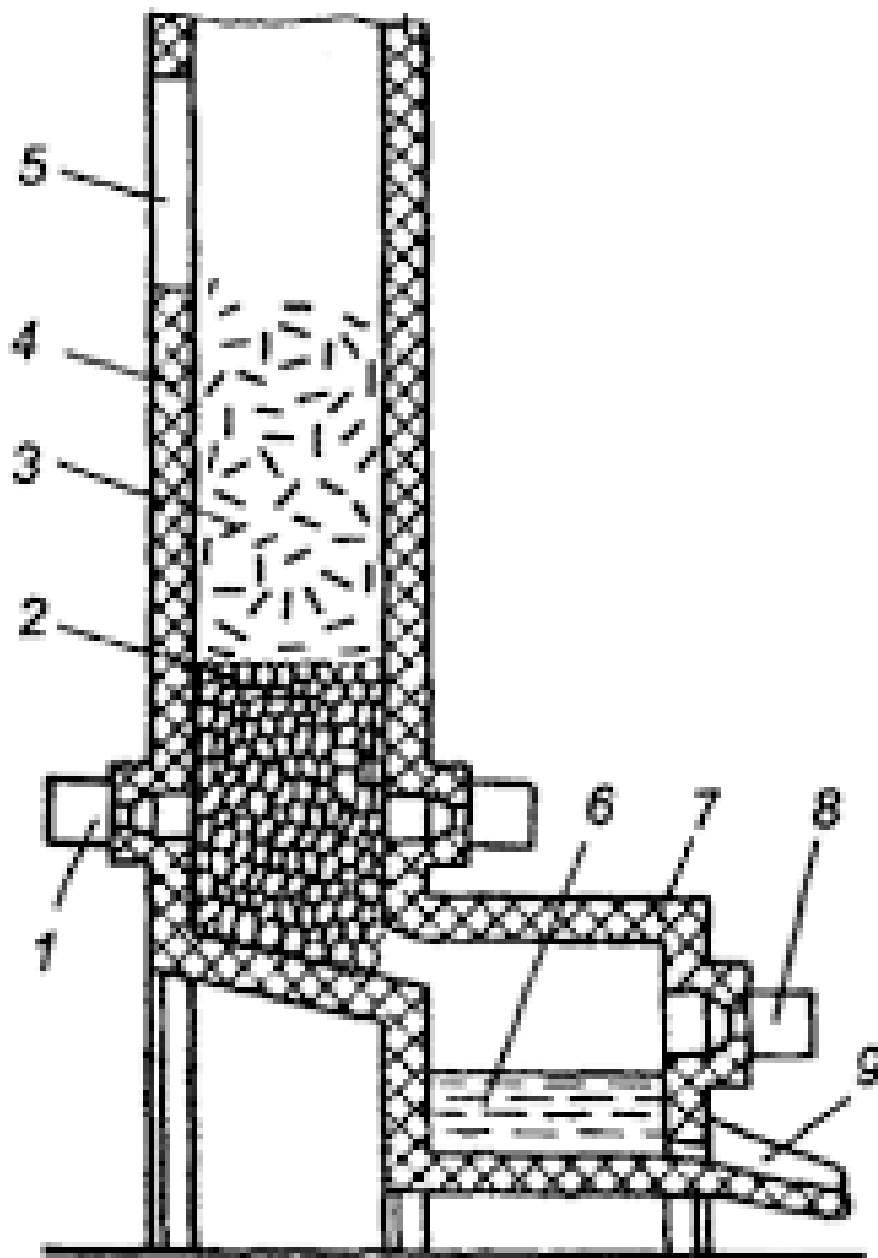


Рис.1. Газова вагранка:  
1,8 – пальники; 2 – керамічна колоша; 3 – шихта; 4 – шахта вагранки;  
5 – рідкий чавун; 6 – накопичувач; 9 – жолоб

## РОЗДІЛ 2. ПОВНИЙ РОЗРАХУНОК ВАГРАНКИ

### 2.1. Розрахунок основних розмірів вагранки [ 1-5 ]

Розрахунок основних розмірів вагранки починається з розрахунку діаметра вагранки

$$D = \sqrt{\frac{G_{\Pi} L_{\alpha} K}{4,71 L'_{\alpha}}},$$

де  $G_{\Pi}$  – продуктивність вагранки, т/год;

$L_{\alpha}$  – витрата повітря в  $\text{нм}^3/\text{кг}$  палива;

$K$  – витрати палива в робочих колошах у відсотках до металозавалки, %;  $L'_{\alpha}$  – питома витрата повітря,  $\text{нм}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{хв})$

Усі ці дані ми вибираємо по діаграмі залежності питомої продуктивності вагранки від температури металу, від питомої витрати повітря і коксу. Приймаємо температуру металу, який випускається  $t = 1450^{\circ}\text{C}$ , питому витрату повітря  $L'_{\alpha} = 110 \text{ нм}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{хв})$ , визначаємо інші параметри, питому витрату палива  $K = 10,8\%$ ,  $L_{\alpha} = 6,5 \text{ нм}^3/\text{м}^2$

$$D = \sqrt{\frac{10 \cdot 6,5 \cdot 10,8}{4,71 \cdot 110}} = 1,164 \text{ м.}$$

За іншою формулою [ 4 ]:  $D = 1,12 \sqrt{\frac{G_{\Pi}}{m'_{\text{м}}}}$ ,

де  $G_{\Pi}$  – продуктивність вагранки, т/год;

$m'_{\text{м}}$  – питома продуктивність вагранки,  $m'_{\text{м}} = 9 \text{ т}/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$ .

$$D = 1,12 \sqrt{\frac{10}{9}} = 1,180 \text{ м.}$$

Отримані дані майже ідентичні, приймаємо діаметр вагранки  $D = 1200$  мм.

Наступний важливий розмір – корисна висота вагранки, тобто відстань між віссю нижнього основного ряду фурм та порогом завантажувального вікна

$$H_0 = 4,25\sqrt{D} = 4,25\sqrt{1,2} = 4,7 \text{ м.}$$

Для отримання загальної висоти вагранки  $H$  потрібно до корисної висоти додати відстань від осі основного ряду фурм до поду та відстань від поду до рівня полу цеху:

$$H_3 = H_0 + H_1 + H_2 = 4,7 + 0,6 + 1,5 = 6,8 \text{ м,}$$

де  $H_1$  – відстань від осі основного ряду фурм до поду; приймаємо  $H_1 = 0,6$  м,  $H_2$  – відстань від поду до полу цеху, приймаємо  $H_2 = 1,5$  м.

Діаметр металеві льотки:

$$d_{\text{мл}} = 1,1\sqrt{G_{\text{п}}/(3600\tau\omega)} = 1,1\sqrt{10/(3600 \cdot 7,2 \cdot 0,8)} = 0,024 \text{ м,}$$

де  $\tau$  – густина сплаву,  $\tau = 7,2$  г/см<sup>3</sup>;

$\omega$  – швидкість витікання чавуну (0,5...1,0) м/с.

Діаметр шлакової льотки:

$$d_{\text{шл}} = d_{\text{мл}} + 30...50 \text{ мм.}$$

Приймаємо  $d_{\text{шл}} = 60$  мм.

Площа поперечного перерізу вагранки

$$F = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 1,2^2}{4} = 1,13 \text{ м}^2$$

Тиск дуття можна визначити за формулою Л.М. Марієнбаха:

$$P = \frac{(L'_\alpha)^b}{A} \cdot (H_{\text{кор}} + 0,25D) = \frac{110^2}{100} (4,7 + 0,25 \cdot 1,164) = 604 \text{ мм вод. ст.,}$$

де  $A$  – коефіцієнт, який залежить від щільності укладки шихти;

$b$  – показник ступеня, зазвичай приймають  $b = 2$ .

Внутрішній діаметр копильника приймаємо рівним внутрішньому діаметру вагранки  $d_{\text{к}} = D = 1200$  мм.

Висота металоприймача копильника від поду до осі шлакової льотки:

$$H_{\text{м}} = \frac{4G_{\text{п}} \cdot 10^3}{\pi\rho_{\text{м}}D} + b = \frac{4 \cdot 10 \cdot 10^3}{3,14 \cdot 7200(1,2)^2} + 0,06 = 1,31 \text{ м}$$

Відстань від осі шлакової льотки до нижнього краю перехідної льотки:

$$S \approx \frac{1}{3} H_m = \frac{1}{3} \cdot 1,31 = 0,44 \text{ м.}$$

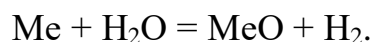
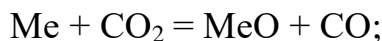
## 2.2. Плавка чавуну в газових вагранках [ 1-5]

Класифікація газових вагранок базується на конструктивних особливостях, виділяючи чотири основні типи: пристрої з виносною камерою перегріву, варіанти з перемичкою в шахті, конструкції з уступами та агрегати з вогнетривкою холостою колошою.

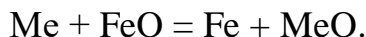
Паливом у газовій вагранці є природний газ.

Газова фаза складається з 10 % CO<sub>2</sub>, 20 % H<sub>2</sub>O, 70 % N<sub>2</sub>.

Атмосфера окислювальна, тому відбуваються процеси окислення за реакціями:



При плавленні і перегріванні закис заліза FeO окислює C, Si, Mn за реакціями:



Угорає 8-12 % C, 10-15 % Si, 15-20 % Mn, 30-40 % S.

В чавуні вміщується 0,02-0,05 % S.

Плавка чавуну в газових вагранках має наступні переваги:

- викид шкідливих речовин мінімальний;
- нижче вміст сірки в одержуваному чавуні;
- вище якість чавуну та нижче собівартість.

Недоліки – більш складна футеровка і підвищена витрата вогнетривів.

В газових вагранках з холостою колошою до її складу разом з вогнетривкими матеріалами додається кокс або інший вуглецевий матеріал, що дозволяє протіканню реакції  $\text{MeO} + \text{C} = \text{Me} + \text{CO}$ . Знижуються угари, відбувається навуглецювання чавуну, покращуються умови роботи холостої

колоші, так як куски вуглецевого матеріалу роз'єднують куски вогнетривів і не дозволяють їм злипатися і осідати, газова фаза стає менш окислювальною.

Принцип перегріву чавуну в газових вагранках аналогічний коксовим процесам. Металеві краплі, стікаючи крізь насадку з вогнетривких матеріалів холостої колоші, проходять стадію ефективного нагріву. При контакті з вуглецевими елементами метал насичується вуглецем, а оксиди відновлюються. При цьому рівень чавунного угару в таких агрегатах суттєво менший.

### РОЗДІЛ 3. МАТЕРІАЛЬНИЙ БАЛАНС [2-6]

Розрахунок матеріального балансу будемо проводити на 100 кг металозавалки.

Прибуток:

1. Металозавалка – 100 кг;

2. Газ.  $\Pi = 10$  т/год;  $Q_H^p = 35838,6$ ;  $\eta = 0,5$

$$\eta = \frac{\Pi' \cdot c \cdot t_c}{B \cdot Q_H^p};$$

де  $\Pi'$  – кг/с.

При нормальних умовах 1 кмоль  $\text{CH}_4$  займає об'єм 22,4  $\text{нм}^3$ .

$$\rho_{\text{CH}_4} = \frac{12 + 4}{22,4} = 0,71 \text{ кг/нм}^3;$$

$$B = \frac{\Pi' \cdot c \cdot t}{Q_H^p \cdot \eta \cdot \rho_{\text{пр.г}}} = \frac{10000 \cdot 0,84 \cdot 1480}{3600 \cdot 35838,6 \cdot 0,5 \cdot 0,71} = 0,24 \text{ кг/с.}$$

3. Вапняк. Витрату вапняку приймаємо  $m_b = 3,0$  кг/(100 кг м/з);

4. Повітря. Витрату повітря знаходимо за формулою  $m_{\text{п}} = 6 L'_\alpha F_b \rho_{\text{п}} / \Pi$

де  $F_b$  – площа поперечного перерізу вагранки, яка для 10-тонної вагранки становить 1,13  $\text{м}^2$ ;  $\rho_{\text{п}}$  – густина повітря, яку приймаємо 1,29  $\text{кг/м}^3$ ;  $\Pi$  – продуктивність вагранки 10 т/г.

Маємо

$$m_{\text{пк}} = 6 \cdot 80 \cdot 1,13 \cdot 1,29 / 10 = 70 \text{ кг/(100 кг м/з)};$$

$$m_{\text{п}} = B \cdot L_{\text{виг}} = 0,2 \cdot 1,1 = 0,22 \text{ нм}^3/\text{с} \cdot 1,29 = 0,28 \text{ кг/с.}$$

5. Футеровка. Згідно з виробничими даними приймаємо футеровку

$$m_{\text{ф}} = 0,74 \text{ кг/(100 кг м/з)}.$$

Видаток

1. Чавун. Кількість чавуну на виході із вагранки дорівнює масі металозавалки мінус угар кремнію  $m_{\text{Si}}$ , угар марганцю  $m_{\text{Mn}}$ , угар заліза  $m_{\text{Fe}}$ ,

угар (пригар) вуглецю  $\pm m_C$ , а також мінус кількість неметалевих включень у металозавалці  $m_{мз}$ .

Приймаємо вміст у готовому чавуні  $[Si] = 2,6\%$ ,  $[Mn] = 1,0\%$ . Крім того, приймаємо угари  $U_{Si} = 20\%$ ,  $U_{Mn} = 30\%$ ,  $U_C = 0\%$ . Далі на підставі заводських даних приймаємо  $m_{Fe} = 0,4 \text{ кг}/(100 \text{ кг м/з})$ ,  $m_{м.з.} = 0,2 \text{ кг}/(100 \text{ кг м/з})$  [ 1,2 ].

Розраховуємо кількості окислених кремнію і марганцю, а також кількості рідкого чавуну:

$$m_{Si} = 2,6 \cdot 20 / (100 - 20) = 0,65 \text{ кг}/(100 \text{ кг м/з});$$

$$m_{Mn} = 1,0 \cdot 30 / (100 - 30) = 0,43 \text{ кг}/(100 \text{ кг м/з});$$

$$m_{ч} = 100 - 0,65 - 0,43 - 0,4 - 0,2 = 98,32 \text{ кг}/(100 \text{ кг м/з}).$$

2. Шлак. Визначаємо кількість шлаку, враховуючи всі статті надходження до нього:

$$m_{ш} = m_{шSi} + m_{шMn} + m_{шFe} + m_{шм.з.} + m_{шв} + m_{шф},$$

де окремі доданки правої частини є надходженням у шлак за рахунок: окислення кремнію, марганцю, заліза, неметалевих включень металозавалки, вапняку, футеровки.

$$m_{ш} = 0,65 \cdot 60 / 28 + 0,43 \cdot 71 / 55 + 0,4 \cdot 72 / 56 + 0,2 + 3 \cdot 56 / 100 + 0,74 = 5,13 \text{ кг}/(100 \text{ кг м/з}).$$

3. Відхідні гази. Кількість газів розраховуємо як суму кількості повітря,  $CO_2$  із вапняку мінус кисень, який пішов на окислення кремнію, марганцю, заліза:

$$m_r = 70 + 3 \cdot 44 / 100 - 0,65 \cdot 32 / 28 - 0,43 \cdot 16 / 55 - 0,4 \cdot 16 / 56 = 70,81 \text{ кг}/(100 \text{ кг м/з}).$$

Складаємо таблицю матеріального балансу (табл. 3.1)

Таблиця 3.1

Матеріальний баланс плавки чавуну у газовій вагранці ємністю 10 т/год

№ статті	Статті прибутку	Кг/(100 кг м/з)	№ статті	Статті видатку	Кг/(100 кг м/з)
1	Металозавалка	100,00	1	Чавун	98,32
2	Газ	0,24	2	Шлак	5,13
3	Вапняк	3,00	3	Відхідні гази	70,81
4	Повітря	70,28		Всього	174,26
5	Футеровка	0,74			
	Всього	174,26			

## РОЗДІЛ 4. ТЕПЛОВИЙ БАЛАНС [1-6]

Аналіз теплової роботи вагранки базується на складанні її теплового балансу, який описує закон збереження енергії. Дана характеристика дозволяє розрахувати необхідну кількість палива та оцінити технічні параметри роботи агрегату.

Тепловий баланс складається з двох частин: прибутку і видатку теплоти. Його складають або на одиницю часу, яка дорівнює секунді (печі безперервної дії), або на період (печі періодичної дії).

Розглянемо тепловий баланс вагранки.

$$Q_{\text{х.п.}} + Q_{\text{ф.п.}} + Q_{\text{ф.пов.}} + Q_{\text{екз}} = Q_{\text{ч}} + Q_{\text{ш}} + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_{5,\text{кл}} + Q_{5,\text{ох.}} + Q_{5,\text{виб}} + Q_{5,\text{випр}} + Q_{5,\text{обл}} + Q_6 \pm \Delta Q$$

Прибуткова частина складається із статей, де  $Q_{\text{х.п.}}$  – теплота згорання природного газу;  $Q_{\text{ф.п.}}$  – фізична теплота, яка вноситься підігрітим паливом;  $Q_{\text{ф.пов.}}$  – фізична теплота, яка вноситься підігрітим повітрям;  $Q_{\text{екз}}$  – теплота екзотермічних реакцій окислення домішок металу.

Видаткова частина складається із статей:  $Q_{\text{ч}}$  – теплота чавуну;  $Q_{\text{ш}}$  – теплота шлаку;  $Q_2, Q_3$  – фізична і хімічна теплота відхідних газів;  $Q_4$  – втрати теплоти внаслідок фізичного недопалу палива;  $Q_{5,\text{кл}}$  – втрати теплоти теплопровідністю через кладку;  $Q_{5,\text{охол}}$  – втрати теплоти з охолоджуючою водою;  $Q_{5,\text{виб}}$  – втрати теплоти на вибивання;  $Q_{5,\text{випр}}$  – втрати теплоти випромінюванням через відкриті вікна і отвори;  $Q_{5,\text{обл}}$  – втрати теплоти на нагрівання допоміжного обладнання;  $Q_6$  – втрати теплоти на акумуляцію її кладкою;  $\Delta Q$  – відхил теплового балансу (складається тільки при складанні теплового балансу діючих печей).

Хімічна теплота палива (газу)

$$Q_{\text{х.п.}} = Q_{\text{н}}^{\text{п}} \cdot B, \text{ кВт.}$$

де  $Q_H^p$  – нижча теплотворність палива;

$B$  – витрата палива, кг/с

$$Q_{x.п.} = 35838,6 \cdot B, \text{ кВт.}$$

Оскільки газ, а також інші шихтові матеріали спеціально не підігріваються, то  $Q_{ф.п.} = 0$ .

Фізична теплота повітря, якщо прийняти  $t_{пов} = 400$  °С

$$Q_{ф.пов.} = (125,6/1,29) \cdot 1,35 \cdot 400(10000/100)/(0,9832 \cdot 3600) = 1485 \text{ кВт.}$$

Знаходимо теплоту екзотермічних реакцій окислення домішок чавуну, а також заліза, прийнявши теплові ефекти реакцій окислення кремнію, марганцю і заліза, відповідно  $\Delta H_{Si} = 31430$ ,  $\Delta H_{Mn} = 7000$  і  $\Delta H_{Fe} = 4810$  кДж/кг.

Прибуток теплоти від екзотермічних реакцій визначається за формулою:

$$Q_{екз} = \sum m_i (-\Delta H_i),$$

де  $m_i$  – маса окислювального елемента, кг/с (визначається шляхом складання матеріального балансу процесу в печі);  $\Delta H_i$  – ентальпія окислення  $i$ -го елемента, кДж/кг (знаходиться за допомогою термодинамічних таблиць)

$$Q_{екз} = \frac{(31430 \cdot 0,65 + 7000 \cdot 0,43 + 4810 \cdot 0,4) \cdot 10000}{3600 \cdot 0,9832 \cdot 100} = 717 \text{ кВт}$$

Видаток теплоти. Теплота чавуну і шлаку на виході із вагранки при ентальпії їх, відповідно,  $h_{ч} = 0,88t_{ч} + 105$ ;  $h_{ш} = 1,46t_{ш} + 209$  кДж/кг і температурі шлаку, на  $50^0$  більшою за температуру металу:

$$Q_{ч} = (0,88t_{ч} + 105) \cdot 10000/3600 = (0,88 \cdot 1400 + 105) \cdot 10000/3600 = 3712 \text{ кВт};$$

$$Q_{ш} = 0,0671(1,46 \cdot 1450 + 209) \cdot 10000/3600 = 433 \text{ кВт.}$$

Фізична і хімічна теплота відхідних газів при  $t_r = 900^0$  С і  $CO = 10\%$

$$Q_2 = V_{\alpha, пр.г}^{HM^3/HM^3_{пр.г}} \cdot c_d t_d = 0,13 \cdot 10 \cdot 1,5 \cdot 900 = 1755 \text{ кВт,}$$

де  $V_{\alpha, \text{пр.г.}}$  – об'єм вологих продуктів горіння при коефіцієнті залишку повітря  $\alpha$  на одиницю палива з урахуванням вибиття газів та підсосу повітря через вікно і нещільності вагранки,  $\text{нм}^3/\text{нм}^3$

$$Q_3 = B \cdot V_{\alpha}^{\text{вл.д.}} \cdot \frac{3045 \text{СО}}{100} = 76 \cdot 2,49 \cdot 3045 \cdot 0,1 \cdot 4,21/100 = 2426 \text{ кВт},$$

де  $V_{\alpha}^{\text{вл.д.}}$  – об'єм горіння за одиницю палива.

Втратами теплоти внаслідок недопалу палива нехтуємо:  $Q_4 = 0$ .

Втрати теплоти теплопровідністю через кладку знаходимо для таких умов: зовнішній діаметр вагранки  $D_{\text{зовн}} = 1,2 \text{ м}$ , корисна висота робочого простору  $H = 4,7 \text{ м}$ ; температура кожуха  $t_{\text{к}} = 100^{\circ}\text{C}$ ; температура повітря  $t_{\text{п}} = 20^{\circ}\text{C}$ , ефективний коефіцієнт тепловіддачі від кожуха до навколишнього повітря  $\alpha = 15 \cdot 10^{-3} \text{ кВт}/(\text{м}^2\text{К})$ . Маємо:

$$Q_{5\text{кл}} = \alpha(t_{\text{к}} - t_{\text{п}}) \cdot F = 15 \cdot 10^3 (100 - 20) \cdot \pi \cdot 1,83 \left( 6,65 + \frac{1,83}{4} \right) = 49 \text{ кВт}.$$

Втрати теплоти із охолоджуючою водою знаходимо із умов, що становлять 5% від хімічної теплоти палива:

$$Q_{5,\text{охол}} = 0,05B \cdot 35838,6 = 1791,93B.$$

Всі інші статті втрат серії  $Q_5$ , а також статті  $Q_6$  і  $\Delta Q$  відсутні.

$$Q_{5,\text{виб}} = Q_{5,\text{обл}} = Q_6 = \Delta Q = 0.$$

Підставляємо знайдені значення статей прибутку і видатку теплоти у рівняння теплового балансу:

$$35838,6B + 1485 + 717 = 3712 + 433 + 1755 + 2426 + 49 + 1791,93B;$$

$$34046,67B = 6173; \quad B = 0,1813 \text{ кг/с}.$$

Витрата металозавалки за секунду

$$П' = 10000 / (3600 \cdot 0,9832) = 2,8252 \text{ кг/с}.$$

Результати розрахунку зводимо у табл. 4.1.

Таблиця 4.1

## Тепловий баланс газової вагранки продуктивністю 10 т/год

№ п/п	Прибуток теплоти	кВт	%	№ п/п	Видаток теплоти	кВт	%
1	$Q_{х.п.}$	6498	74	1	$Q_{ч}$	3712	42,5
2	$Q_{ф.пов}$	1485	18	2	$Q_{ш}$	433	5,00
3	$Q_{скз}$	717	8	3	$Q_2$	1755	20,00
	Всього	8700	100,0	4	$Q_3$	2426	28,00
				5	$Q_{5,кл}$	49	0,50
				6	$Q_{охол}$	325	4,00
					Всього	8700	100,0

Коефіцієнт корисної дії вагранки  $\eta = (3712 + 433) \cdot 100 / 6498 = 63,79\%$ .

## РОЗДІЛ 5. РОЗРАХУНОК ГОРІННЯ ПАЛИВА

### 5.1. Розрахунок горіння природного газу [2-6]

Для досягнення найкращих теплових показників роботи агрегату важливо забезпечити точну витрату палива в часі та підтримувати раціональне співвідношення паливо/повітря.

Проектна потужність печі розраховується на основі її теплового балансу. Обсяг повітря, потрібний для спалювання палива, а також склад і температуру димових газів, знаходять шляхом розрахунку процесів горіння.

Паливо – це горюча речовина, яку з технічних, економічних та санітарно-гігієнічних міркувань доцільно спалювати в промисловості, побуті та транспорті.

Природний газ – високоякісне, порівняно дешеве паливо, основною складовою якого є метан  $\text{CH}_4$  при незначному вмісті  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$ . Природні газу поділяються на дві групи – газу чисто газових родовищ і газу нафтових родовищ. Перші (сухі) містять у собі до 98 % метану, їх теплотворність становить 29000...38000 кДж/нм<sup>3</sup>. Інші (жирні) мають менше метану і підвищену кількість вищих вуглеводів, їх теплотворність, відповідно, вище і становить 33500...63000 кДж/нм<sup>3</sup>.

Маємо природний газ наступного хімічного складу, % за об'ємом [2, 4]:

$\text{CO}_2$	$\text{CH}_4$	$\text{C}_2\text{H}_6$	$\text{C}_3\text{H}_8$	$\text{C}_4\text{H}_{10}$	$\text{C}_5\text{H}_{12}$	$\text{N}_2$	$\Sigma$
0,2	94	1,2	0,7	0,4	0,2	3,3	100

Вміст вологу у газу  $g_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{ст}} = 35$  г/нм<sup>3</sup>, у повітрі  $g_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{сп}} = 15$  г/нм<sup>3</sup>

$$Q_{\text{H}}^{\text{P}} = 8533 \text{ ккал/нм}^3 = 35838,6 \text{ кДж.}$$

Витрата кисню:

$$v_{\text{O}_2} = 0,01 \left[ \left( m + \frac{n}{4} \right) C_m H_n - \text{O}_2 \right];$$

$$v_{O_2} = 0,01 \left[ \left( 1 + \frac{4}{4} \right) \cdot 94 \right] + \left( 2 + \frac{6}{4} \right) \cdot 1,2 + \left( 9 + \frac{8}{4} \right) \cdot 0,7 + \left( 4 + \frac{10}{4} \right) \cdot 0,4 + \left( 5 + \frac{12}{4} \right) \cdot 0,2 = 2,041 \text{ нм}^3/\text{нм}^3.$$

Витрата сухого повітря:

$$L_0 = (1 + K) \cdot v_{O_2} = (1 + 3,762) \cdot 2,041 = 9,719 \text{ нм}^3/\text{нм}^3,$$

де  $K$  – відношення вмісту азоту у повітрі до вмісту у ньому кисню (для звичайного повітря  $K = 79/21 = 3,762$ ).

Витрата вологого повітря:

$$L_0^B = 4,762 \left( 1 + 0,001244 \cdot g_{H_2O}^{c.p.} \right) v_{O_2} = 4,762 (1 + 0,001244 \cdot 15) \cdot 2,041 = 9,90 \text{ нм}^3/\text{нм}^3.$$

Дійсна витрата повітря:

$$L_\alpha = \alpha \cdot L_0 = 1,1 \cdot 9,90 = 10,89 \text{ нм}^3/\text{нм}^3,$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт надлишку повітря, який показує, у скільки разів фактична витрата повітря більша за теоретичну.

Витрата продуктів згорання при  $\alpha = 1$ .

$$\begin{aligned} V_0^{BD} &= 0,01 \left[ \underbrace{CO_2 + CO + \sum m C_m H_n + SO_2 + H_2S}_{RO_1} + \underbrace{\sum (n/2) C_m H_n + H_2}_{H_2O} + \right. \\ &\quad \left. + 0,1244 \left( \underbrace{g_{H_2O}^{cf} + g_{H_2O}^{cp} \cdot L_0}_{H_2O} \right) + \underbrace{H_2S + N_2}_{N_2} \right] + K v_{O_2} = \\ &= 0,01 [0,2 + 94 + 2 \cdot 1,2 + 3 \cdot 0,7 + 4 \cdot 0,4 + 5 \cdot 0,2 + 2 \cdot 94 + 3 \cdot 1,2 + 4 \cdot 0,7 + \\ &\quad + 5 \cdot 0,4 + 6 \cdot 0,2 + 0,1244 (35 + 15 \cdot 9,90) + 3,3] + 3,762 \cdot 2,041 = 0,01 [0,2 + 94 + \\ &\quad + 2,4 + 2,1 + 1,6 + 1 + 1,88 + 3,6 + 2,8 + 2 + 1,2 + 21,4 + 3,3] + 7,09 = 10,028 \text{ нм}^3/\text{нм}^3. \end{aligned}$$

Кількість продуктів згорання при  $\alpha = 1,1$

$$\begin{aligned} V_\alpha^{BD} &= V_0 + \underbrace{0,001244 g_{H_2O}^{cf} (\alpha - 1) (1 + K) v_{O_2}}_{H_2O'} + \underbrace{(\alpha - 1) K \cdot v_{O_2}}_{N_2} + \underbrace{(\alpha - 1) v_{O_2}}_{O_2} = \\ &= 10,028 + 0,001244 \cdot 15 \cdot (1,1 - 1) (1 + 3,762) \cdot 2,041 + (1,1 - 1) \cdot 3,762 \cdot 2,041 + \\ &\quad + (1,1 - 1) \cdot 2,041 = 10,028 + 0,018 + 0,767 + 0,204 = 11,017 \text{ нм}^3/\text{нм}^3. \end{aligned}$$

Хімічний склад продуктів згорання газу:

$$RO_2 = \left( 1,013 \cdot \frac{100}{11,017} \right) = 9,20 \%;$$

$$\text{H}_2\text{O} = (1,304 + 0,018) \frac{100}{11,017} = 10,41 \ %;$$

$$\text{N}_2 = (7,711 + 0,767) \frac{100}{11,017} = 76,94 \ %;$$

$$\text{O}_2 = \frac{2,041 \cdot 100}{11,017} = 3,45 \ %;$$

---

$$\Sigma = 100,00 \ %.$$

Калориметрична температура горіння:

$$t_{\text{к}} = (Q_{\text{н}}^{\text{р}} + Q_{\text{ф.пов.}}) / V c_{\text{д}} = (35838,6 + 1485) / (10,028 \cdot 1,594) = 2335^{\circ} \text{C},$$

$c_{\text{д}}$  – теплоємність продуктів згорання

$$c_{\text{д}} = 1,4 + 1,36 \cdot 10^{-4} t = 1,4 + 1,36 \cdot 10^{-4} \cdot 1430 = 1,594 \text{ кДж}/(\text{нм}^3\text{К}).$$

Теоретична температура горіння:

$$t_{\text{т}} = \frac{Q_{\text{н}}^{\text{р}} + Q_{\text{ф.пов.}}}{V_{\alpha} c_{\text{д}}} = \frac{35838,6 + 1485}{11,017 \cdot 1,594} = 2126^{\circ} \text{C}.$$

Дійсна температура горіння:

$$t_{\text{д}} = \frac{Q_{\text{н}}^{\text{р}} + Q_{\text{ф.пов.}} - Q_{\text{втр}}}{V_{\alpha} c_{\text{д}}} = \frac{35838,6 + 1485 - 10751,6}{11,017 \cdot 1,594} = 1514^{\circ} \text{C}.$$

$$Q_{\text{втр}} = (0,2 \dots 0,4) Q_{\text{н}}^{\text{р}} = 0,3 \cdot 35838,6 = 10751,6 \text{ кДж}.$$

## РОЗДІЛ 6. РОЗРАХУНОК ПАЛЬНИКА ДЛЯ СПАЛЮВАННЯ ПРИРОДНОГО ГАЗУ [ 2, 6 ]

На сьогодні природний газ залишається домінуючим видом палива, для спалювання якого застосовують спеціальні пальникові пристрої. До середини 70-х років ХХ століття сфера розробки пальників розвивалася хаотично через відсутність єдиних стандартів та розрізненість виробників, що зумовило значне різноманіття конструкцій. Ситуація почала змінюватися у 1972 році, коли стартувала систематична державна сертифікація, спрямована на впорядкування парку промислових пальників.

Внаслідок цієї роботи за останні роки для економії та підвищення ефективності використання природного газу зробили наступне:

- розробили більш ефективні конструкції пальникових устроїв, газовикористовуючої техніки;
- розроблені та введені в дію державні стандарти на пальники, правила проектування печей та інші нормативні документи;
- проведені державні випробовування пальників.

Щоб спалити газ, потрібно спочатку змішати його з повітрям, підігріти цю суміш до температури, при якій починається процес горіння. Прогрів суміші та горіння газу протікає дуже швидко, тому лімітуючим процесом горіння газоподібного палива є процес змішування, тобто процес приготування суміші. Чим гірше змішування газу з повітрям, тим довший факел – видима частина полум'я.

Вибір конструкції пальника визначається двома умовами – пальник повинен забезпечувати максимальну повноту спалювання газу, а також здатний протидіяти опору стовпа шихтових матеріалів руху продуктів горіння, які надходять з неї. Останнє визначається тиском повітря, стиснутого в пальнику.

Найбільш розповсюдженими є безполуменеві пальники високого тиску. В печах розповсюджені інжекційні пальники. Застосовують інжекційні

пальники високого та низького тиску. Пальники першого типу потребують високого тиску газу – від декількох сотень міліметрів водяного стовпа до 1 атм. Пальники високого тиску застосовують для газів різної калорійності. Інжекційні пальники дозволяють застосовувати підігріті газ та повітря. Температура підігрітого газу та повітря при цьому повинні бути нижче температури загорання суміші.

Для нашої вагранки вибираємо інжекційний пальник високого тиску типу ВП.

Газ, виходячи з сопла, підсмоктує повітря з навколишнього середовища. Кількість підсмоктуючого повітря регулюється регулятором повітря, який представляє собою шайбу, що переміщується по різьбі на зовнішній поверхні сопла. При її обертанні змінюється площа щілини, крізь яку підсмоктується повітря.

Приймаємо тиск природного газу рівним  $300 \text{ кН/м}^2$  та проводимо розрахунок за наступними даними: кратність інжекції з урахуванням 5% надлишкового повітря  $\psi_0 = 10$ ; початкова температура газу та повітря  $T_{1,п} = T_{2,п} = 293 \text{ К}$ ; нормальна густина газу та повітря  $\rho_{0_1} = 0,783 \text{ кг/м}^3$ ,  $\rho_{0_2} = 1,293 \text{ кг/м}^3$ ; газова стала і показник ступеня адіабати природного газу  $R = 475 \text{ нм/кгК}$ ,  $k = 1,3$ ; витрата газу  $V_{0_1} = 200 \text{ м}^3/\text{Год}$  ( $0,0435 \text{ кг/сек}$ ); коефіцієнт опору при вході повітряного потоку в змішувач  $k_c = 0,25$ ; тиск природного газу перед горілкою  $150 \text{ кН/м}^2$ ; надлишковий тиск в паливному просторі  $(P_{пр} - P_{окр}) = 20 \text{ н/м}^2$ ; опір регулюючого устрою  $100 \text{ н/м}^2$ .

Розраховуємо параметри природного газу при  $P_{окр} = 99,2 \text{ кН/м}^2$ .

Критична швидкість витоку газу із сопла

$$W_{кр} = \sqrt{2 \frac{k}{k+1} RT_H} = \sqrt{2 \frac{1,3}{1,3+1} \cdot 475 \cdot 293} = 396 \text{ м/с.}$$

Критерій швидкості витоку газу  $\lambda = W/W_{кр}$  при

$$P_{окр}/P_H = 99,2/300 = 0,33;$$

$$\lambda^2 = \frac{k+1}{k-1} \left[ 1 - \left( \frac{P_{\text{окр}}}{P_{\text{н}}} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] = 7,65 \cdot (1 - 0,33^{0,23});$$

$$\lambda^2 = 1,75; \lambda = 1,31;$$

$$W_1 = \lambda W_{\text{кр}} = 1,31 \cdot 396 = 520 \text{ м/с.}$$

Температура, густина та  $\rho$ ,  $W_1^2$  інжекційного газу:

$$T_1 = T_{\text{н}} \left( 1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda^2 \right) = 293 \left( 1 - \frac{0,3}{2,3} \cdot 1,72 \right) = 228 \text{ К};$$

$$\rho_1 = 99,2 \cdot 10^3 / (4,75 \cdot 228) = 0,915 \text{ кг/м}^3;$$

$$\rho_1 W_1^2 = 0,915 \cdot 520^2 = 247000 \text{ н/м}^2.$$

Критерій  $Eu$  при заданих  $(P_{\text{пр}} - P_{\text{окр}}) = 20 \text{ н/м}^2$  та  $\sum P_{\text{пот}} = 100 \text{ н/м}^2$ ;

$Eu$  – критерій Ейлера  $Eu = \Delta P / \rho u^2$  або

$$Eu = \frac{(P_{\text{пр}} - P_{\text{окр}}) + \sum P_{\text{пот}}}{\rho_1 W_1^2} = \frac{20 + 100}{247000} = 0,000485.$$

Температура і густина газоповітряної суміші

$$\frac{T_{\text{см}}}{T_1} = \frac{1 + 10 \frac{293}{228}}{1 + 10} = 1,26;$$

$$T_{\text{см}} = 1,26 \cdot 228 = 288 \text{ К};$$

$$\frac{T_2}{T_{\text{см}}} = \frac{293}{288} = 1,02;$$

$$\rho_{0\text{см}} / \rho_{01} = 1,59;$$

$$\rho_{0\text{см}} = 1,25 \text{ кг/м}^3; \rho_{\text{см}} = 1,15 \text{ кг/м}^3; \rho_{02} / \rho_{01} = 1,65.$$

Перевіряємо можливість застосування пальника без дифузора по рівнянню. У працездатного пальника повинна виконуватись нерівність  $2BEu \leq 1$ .

Знаходимо число  $B$  для пальника без дифузора за рівнянням:

$$B = 1 + \frac{T_{cm}}{T_1} (1 + \psi_0)^2 \left[ 1 + 2 \frac{\rho_{02}}{\rho_{01}} \cdot \frac{\psi_0}{1 + \psi_0} - \frac{1}{1 + k_c} \cdot \frac{\rho_{02}}{\rho_{01}} \cdot \frac{T_2}{T_{cv}} \cdot \left( \frac{\psi_0}{1 + \psi_0} \right)^2 - \eta \frac{\rho_{0cm}}{\rho_{01}} \right] = 1 + 1,26(1 + 10)^2 \left[ 1 + 2 \cdot 1,65 \cdot \frac{10}{11} - \frac{1}{1 + 0,25} \cdot 1,65 \cdot 1,02 \cdot \left( \frac{10}{11} \right)^2 \right] = 443$$

$$2BEu = 2 \cdot 443 \cdot 0,000485 = 0,43.$$

Число  $2BEu$  менше одиниці. Пальник може працювати без дифузора.

Розраховуємо коефіцієнт запасу пальника по протитиску.

Максимальне число  $B$ , при якому пальник здатний ще працювати без дифузора, визначається за рівнянням:

$$B_{max} = \frac{1}{2 \cdot 0,000485} = 1030.$$

Коефіцієнт запасу по протитиску

$$K_{зап} = \frac{1030}{443} = 2,32.$$

При збільшенні  $\Delta P_c$  від  $120 \text{ н/м}^2$  до  $2,32 \cdot 120 = 280 \text{ н/м}^2$  пальник може працювати з нормальною кратністю інжектора.

Визначаємо основні розміри пальника. Визначаємо відношення  $F_3/F_1$  при  $B = 443$  та  $2BEu = 0,43$

$$\frac{F_3}{F_1} = \frac{B}{1 + \sqrt{1 - 2BEu}} = \frac{443}{1 + \sqrt{1 - 0,43}} = 252.$$

Площа прохідного перетину та діаметр робочого сопла при  $G_1 = 0,0435 \text{ кг/с}$  та  $\rho_1 = 0,915$ :

$$F_1 = \frac{0,0435}{0,915 \cdot 520} = 0,912 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2;$$

$$d_1 = 0,0108 \text{ м} = 10,8 \text{ мм}; \quad d_{in} = 10,8 + 2 \cdot 2,1 = 15 \text{ мм}.$$

Площа прохідного перетину змішувача та його розміри при  $F_3/F_1 = 252$ :

$$F_3 = 252 \cdot 0,912 \cdot 10^{-4} = 230 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2.$$

$$d_3 = 0,170 \text{ м} = 170 \text{ мм.}$$

Довжина змішувача  $l_3 = 6d_3 = 170 \cdot 6 = 1020 \text{ мм}$

Площу перетину повітряного отвору знаходимо з рівняння:

$$\left( \frac{F_2}{F_3} \right)_{\text{отв}} = 1 + k_c;$$

$$F_2 = (1 + k_c)F_3 = 1,25 \cdot 230 \cdot 10^{-4} = 288 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 = 28800 \text{ мм}^2.$$

Діаметр отвору для проходу повітря при  $d_{in} = 15 \text{ мм}$

$$d_b = \sqrt{\frac{28800}{0,785}} + 225 = 192 \text{ мм.}$$

Відстань від газового сопла до перетину I-I при куті конусності конфузора  $20^\circ$

$$l_c = \frac{d_b - d_3}{2 \text{tg} 10^\circ} = \frac{192 - 170}{0,35} = 63 \text{ мм.}$$

Швидкість вилітання суміші з пальника при  $G_{cm} = 0,763 \text{ кг/с}$  та  $\rho_{cm} = 1,15 \text{ кг/м}^3$  розраховується

$$W_{cm} = \frac{0,763}{1,15 \cdot 230 \cdot 10^{-4}} = 29 \text{ м/с,}$$

де  $G_{cm}$  – масова витрата суміші при  $\psi = 10$  та  $\rho_{0cm} = 1,25 \text{ кг/м}^3$ :

$$G_{cm} = \frac{200 + 10 \cdot 200}{3600} \cdot 1,25 = 0,763 \text{ кг/с.}$$

Корисне розрідження в змішувачі дорівнює повному розрідженню мінус витрати на вхід повітряного потоку в змішувач:

$$\Delta P = \Delta P_c + \frac{1}{2} \rho_{cm} W_{cm}^2 \frac{\psi_0}{1 + \psi_0} f_4^2;$$

$$P_{\text{дил}} = \frac{1}{2} \cdot 1,15 \cdot 29^2 \cdot \frac{10}{11} = 440 \text{ н/м}^2.$$

При заданому  $\Delta P_c = 120 \text{ н/м}^2$

$$\Delta P = 120 + 440 = 560 \text{ н/м}^2.$$

Розрахунок витоку газу був проведений по тиску в навколишньому

середовищі  $P_{н.с.} = 99,2 \text{ кН/м}^2$ . В дійсності розрахунок потрібно було виконувати з поправкою на розрідження в змішувачі, але ця поправка дуже мала ( $0,56 \text{ кН/м}^2$ ) в порівнянні з тиском  $99,2 \text{ кН/м}^2$ , тому перерахування не має сенсу.

В порівнянні з розрахунком пальника природного газу при низькому тиску маємо зробити важливий висновок для практики. Інжекційні пальники високого тиску не потребують в установці дифузора.

Завдяки роботі під високим тиском, інжекційні пальники не потребують дифузора, що робить їхню конструкцію компактнішою та простішою.

## **ВИСНОВКИ**

В даній бакалаврській роботі здійснено проектування та розрахунок газової вагранки, що має продуктивність 10 т/год, а також визначено її матеріальний і тепловий баланси та параметри горіння палива.

Приділено увагу детальному аналізу конструкції та функціонування агрегату, визначено його ключові геометричні розміри. Крім того, у роботі обґрунтовано вибір, виконано розрахунок інжекційного пальника, проаналізовано принцип його дії, переваги та недоліки.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Кропивний В.М., Кузик О.В., Босий М.В., Молокост Л.А. Технологія основних виробництв: навч. посіб. для студентів денної та заочної форм навчання. Кропивницький: Видавництво ТОВ «КОД», 2021. 196 с.
2. Сабірзянов Т.Г. Печі ливарних цехів: навч. посіб. для студ. вищих навчальних закладів. Кіровоград: КНТУ, 2007. 280 с.
3. Павленко Т.П., Петренко О.М., Лукашова Н.П. Електротехнологічні установки: Конспект лекцій. Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2018. 130 с.
4. Верховлюк А.М., Нарівський А.В., Могилатенко В.Г. Технології одержання металів та сплавів для ливарного виробництва: навч. посіб. / За ред. академіка НАН України Найдека В.Л. Київ: Видавничий дім “Вініченко”, 2016. 224 с.
5. Методичні вказівки для самостійної роботи з дисципліни «Виробництво виливків із кольорових металів» Печі для плавлення кольорових сплавів для студентів напряму ”Ливарне виробництво”. [укл.: Сігарьов М.К., Стороженко С.А.]. Дніпродзержинськ: ДДТУ, 2014. 30с.
6. Турич В.В., Руткевич В.С. Матеріалознавство: навч. посіб. Вінниця: РВВ ВНАУ, 2012. 100с.

# ДОДАТКИ