

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

**А.Р. Степанюк**

# **СПЕЦІАЛЬНІ МЕТОДИ ТЕРМІЧНОЇ ПІДГОТОВКИ**

**Рекомендації до виконання  
розрахункової роботи**

*Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського  
як навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра,  
за освітньою програмою «Комп'ютерно-інтегровані технології проектування  
обладнання хімічної інженерії»  
спеціальності 133 «Галузеве машинобудування»,*

Електронне мережеве навчальне видання

Київ  
КПІ ім. Ігоря Сікорського  
2024

УДК 662.982  
С79

Укладачі: *Степанюк Андрій Романович*, канд. техн. наук, доцент

Рецензент: *Сокольський Олександр Леонідович*, канд. техн. наук, доц.

Відповідальний редактор *Корнієнко Ярослав Микитович*, д-р техн. наук, проф.

*Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського  
(протокол № 5 від 29.02.2024 р.)  
за поданням вченої ради Інженерно-хімічного факультету  
(протокол № 2 від 26.02.2024 р.)  
Електронне мережне навчальне видання*

**Степанюк А.Р.**

С79 Спеціальні методи термічної підготовки [Електронний ресурс]: рек. до виконання розрахунк. роботи: навч. посіб. для студ. ступеня бакалавра за освітн. програмою «Комп'ютерно-інтегровані технології проектування обладнання хімічної інженерії» спец. 133 «Галузеве машинобудування» / А.Р. Степанюк; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електрон. текст. дані (1 файл). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. – 37 с.

У посібнику викладено теоретичні відомості щодо визначення кількості тепла, що передалось випромінюванням матеріалу, визначення витрат повітря та палива, розрахунок товщини ізоляції печі та визначення висоти димаря та його діаметра для трубчатої печі. Наведено алгоритм виконання розрахункової роботи. Описано вимоги до оформлення та задачі розрахункової роботи. Наведені індивідуальні завдання для розрахунків. Всі необхідні довідкові дані для виконання розрахунків наведені в тексті посібника. Навчальний посібник призначений для здобувачів ступеня бакалавр за спеціальністю 133 Галузе машинобудування, буде також корисним для бакалаврів за спеціальністю 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка.

УДК 662.982

Реєстр. № НП 23/24-345. Обсяг 0,5 авт. арк.

Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»  
проспект Берестейський, 37, м. Київ, 03056  
<https://kpi.ua>

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру видавців, виготовлювачів  
і розповсюджувачів видавничої продукції ДК № 5354 від 25.05.2017 р.

© А.Р. Степанюк, 2024  
© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024

## Зміст

Вступ.....	4
1 АЛГОРИТМ РОЗРАХУНКУ.....	5
2 ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ РОЗРАХУНКОВОЇ РОБОТИ.....	13
2.1 Завдання на розрахункову роботу.....	13
2.2 Склад, обсяг і структура розрахункової роботи.....	13
2.3 Вказівки до виконання розділів розрахункової роботи.....	13
2.4 Структура пояснювальної записки.....	15
2.5 Вимоги до форматування пояснювальних записок.....	15
2.6 Виклад тексту розрахункової роботи.....	16
2.7 Оформлення розрахунків.....	16
2.8 Рекомендації щодо порядку захисту розрахункової роботи.....	18
ПЕРЕЛІК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	19
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	21
Додаток А Зразок титульного листа розрахункової роботи.....	22
Додаток Б Завдання до розрахункової роботи.....	23
Додаток В Приклад оформлення змісту розрахункової роботи.....	25
Додаток Г Приклад оформлення текстової частини розрахункової роботи.....	26

## Вступ

Печі широко використовують в усіх областях промисловості: в хімічній наприклад для обпалювання мідного колчедану при виробництві з нього сірчаної кислоти, для обпалювання сірчанокислотного глинозему – при виробництві соди, аміаку, фосфатних добрив, вугільних матеріалів, шихти, коксу, тощо. В нафтопереробній промисловості та промисловості органічного синтезу, де основними технологічними агрегатами являються трубчасті печі для крекінгу, піролізу та інших процесів. Тому необхідно навчитися визначати основні геометричні розміри елементів трубчастої печі.

Метою роботи є визначення основних геометричних розмірів елементів печі.

Задачі розрахункової роботи:

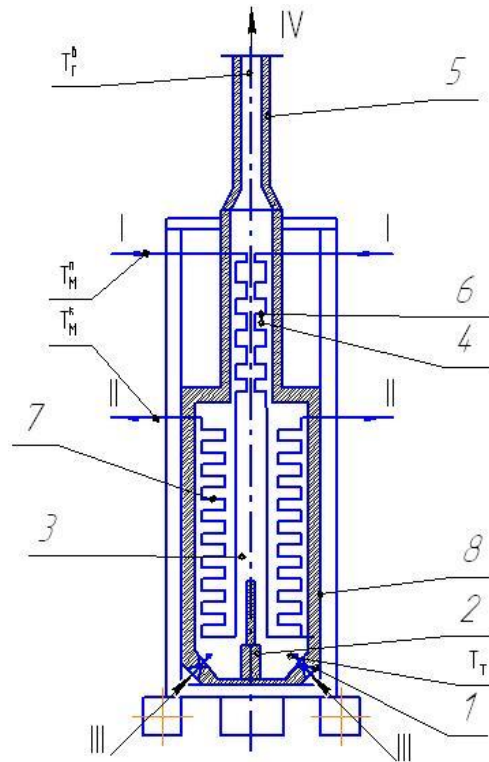
- Визначення кількості тепла, що передалось випромінюванням матеріалу.
- Визначення витрат повітря та палива.
- Розрахунок товщини ізоляції печі.
- Визначення висоти димаря та його діаметра для трубчастої печі.

# 1 АЛГОРИТМ РОЗРАХУНКУ

## 1 Визначення кількості тепла, що передалось випромінюванням матеріалу

Скористаємося алгоритмом за авторами [1, 2].

Схема трубчастої печі з об'ємно-настильним спалюванням палива наведена на рисунку 1



I - форсунка; 2 - настільна стінка; 3 - радіаційна камера (паливна камера);  
4 - камера конвекції; 5 - димар; 6 - змійовик конвекційних труб; 7 - змійовик  
радіантних труб; 8 - футерування.

Рисунок 1 – Схема трубчастої печі з об'ємно-настильним спалюванням палива

Кількість тепла, що отримує матеріал за одиницю часу (потужність передачі тепла) за рахунок випромінювання теплової енергії пічним газом і кладкою печі, дорівнює:

$$Q_{2+k}^n = C_v \cdot F_n \cdot \theta \cdot \xi,$$

де:  $C_v = C_o \cdot \xi_m \cdot \xi_n$ , Вт/(м<sup>2</sup> · К<sup>4</sup>) – коефіцієнт видимого випромінювання;

$C_o$ , Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>) – коефіцієнт чорноти абсолютно чорного тіла,

$$\xi_n = \frac{\omega + 1 - \xi_r}{\beta \frac{1 + \xi_r}{\xi_r}} - \text{набута степінь чорноти пічного простору,}$$

$\beta = \xi_m + \xi_z(1 - \xi_m)$  – ступінь чорноти (відносна випромінювальна здатність)

газу;

$$\omega = \frac{F_k}{F_n} - \text{коефіцієнт, що є відношенням променесприймаючої поверхні}$$

виробів до сумарної внутрішньої поверхні кладки,

$$\theta = \sqrt{\left(\left(\frac{T_r}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_m^k}{100}\right)^4\right) \cdot \left(\left(\frac{T_z}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_m^n}{100}\right)^4\right)}, \text{ К}^4, - \text{температура печі;}$$

$\xi = 1$ , – коефіцієнт, що враховує степінь забруднення поверхні  $F_n$ .

Тоді:

$$Q_{\Gamma+K}^n = C_o \cdot F_n \cdot \theta \cdot \xi, \text{ кВт}$$

Коефіцієнт тепловіддачі випромінюванням дорівнює:

$$\alpha_b = \frac{Q_{\Gamma+K}^n}{F_m \cdot \Delta T_{cp}} =, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}},$$

де  $\Delta T_{cp} = \frac{T_r + T_z}{2} - \frac{T_m^k + T_m^n}{2}$ , К – середня різниця температур.

Коефіцієнт тепловіддачі за рахунок конвекції при швидкості пічних газів  $W_{\Gamma}^t = 0,7$  м/с у вільному перерізі камери визначається за виразом:

$$\alpha_k = \frac{\lambda_z^t \cdot Nu}{d_{екв}},$$

де  $Nu = 0,61 Re^{0,67}$  – критерій Нусельта;

Визначимо середню температуру пічного газу

$$t_r^{cp} = \frac{T_r + T_z}{2} - 273, \text{ К}.$$

За цієї температури визначимо теплофізичні властивості димових газів.

Динамічна в'язкість пічного газу:

$$\mu^t = 2,91 \cdot 10^{-8} t_r^{cp} + 1,62 \cdot 10^{-5}. \text{ Па} \cdot \text{с}.$$

густина пічного газу:

$$\rho_2^t = \rho_2^o \left( \frac{273}{273 + t_{\Gamma}^{cp}} \right), \text{ кг/м}^3 .$$

Теплопровідність пічного газу:

$$\lambda_2^t = 9,3 \cdot 10^{-5} \cdot t_{\Gamma}^{cp} + 2,32 \cdot 10^{-2}. \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)} .$$

Тоді значення критерію Рейнольдса:

$$\text{Re} = \frac{W_{\Gamma}^t \cdot \rho_2^t \cdot d_{\text{екв}}}{\mu_{\Gamma}^t} .$$

Значення критерію Нусельта:

$$\text{Nu} = 0,61 \text{Re}^{0,67} .$$

Коефіцієнт тепловіддачі від газу до матеріалу:

$$\alpha_k = \frac{\text{Nu} \cdot \lambda_{\Gamma}^t}{d_{\text{екв}}}, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}} .$$

Кількість тепла, що передається матеріалу конвекцією:

$$Q_k = \alpha_k \cdot F_M \cdot \Delta T_{cp} =, \text{ кВт} .$$

Загальна кількість підведеного тепла:

$$Q = Q_{\Gamma+k}^n + Q_k, \text{ кВт} .$$

## 2 Визначення витрат повітря та палива

Скористаємося алгоритмом за авторами [1, 2].

Витрати палива:

$$g = \frac{Q}{q_{\text{пал}}}, \text{ кг/с.}$$

Приймаємо коефіцієнт надлишку повітря –  $\alpha_2 = 1,1$ .

Фізичним теплом палива і повітря знехтуємо,

тобто  $q_{\text{физ}}^{n+\text{нов}} = c_n \cdot t_n + c_{\text{нов}} \cdot t_{\text{нов}} \cdot \alpha \cdot L_0 = 0$ .

Питомі витрати повітря можна обчислити за емпіричним рівнянням:

$$V_o = \left( \frac{0,24 \cdot Q_{\text{нз}}^p}{1000} + 0,5 \right) \cdot \alpha_2, \text{ м}^3 / \text{кг палива}$$

Витрати повітря:

$$G = V_o \cdot g, \text{ кг/с.}$$



### 3 Розрахунок товщини ізоляції печі

Товщина ізоляції вибирається за умови меншення втрат тепла у довкілля на 85% ( $\eta_{\text{ізол}} = 0,85$  ).

Скористаємося алгоритмом за авторами [1, 2].

Схема ізоляції печі зображена на рисунку 2.

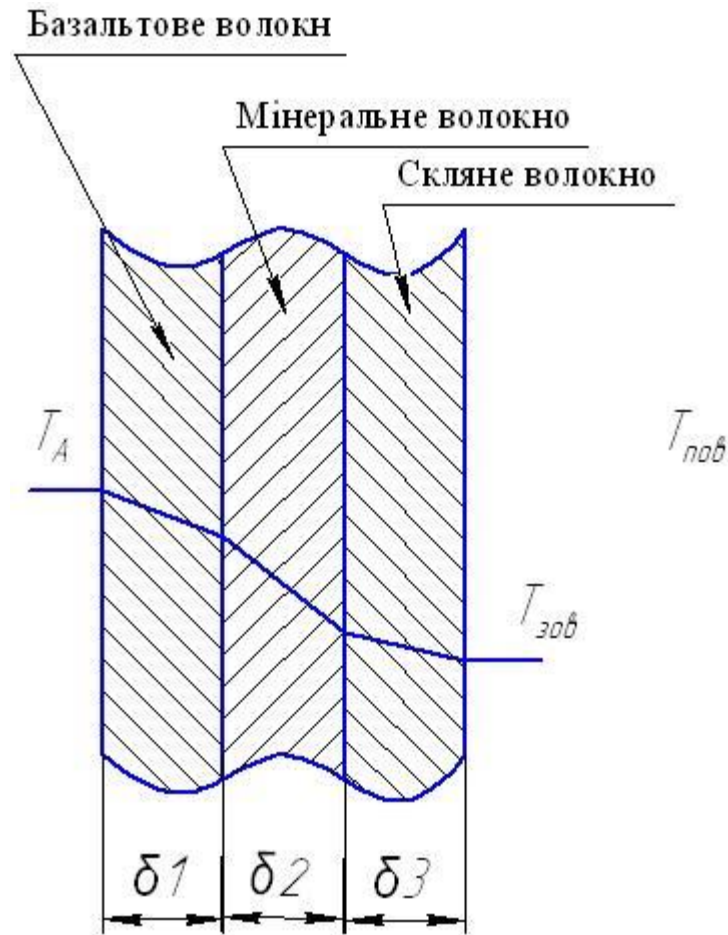


Рисунок 2 – Схема ізоляції печі

Коефіцієнт тепловіддачі від зовнішньої поверхні повітря за рахунок випромінювання та конвекції для неізольованої поверхні  $\alpha_2$ ,  $\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{К}$  орієнтовно можна визначити за залежністю:

$$\alpha_2 = 9,74 + 0,07(t_2 - t_{\text{пов}}), \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$$

Питомий тепловий потік через стінку:

$$q_1 = \alpha_2 \cdot (t_2 - t_{\text{ноє}}), \text{Вт/м}^2$$

Вважаючи, що основний термічний опір дає ізоляція, можна записати:

$$q_1 = K(t_a - t_{\text{ноє}}) \approx \frac{\lambda}{\delta} (t_a - t_{\text{ноє}}) \text{Вт/м}^2,$$

звідки визначаємо товщину ізоляції, враховуючи, що теплопровідність базальтового волокна знаходиться у межах  $\lambda = 0,031 \dots 0,034 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$ , мінерального волокна  $\lambda = 0,04 \dots 0,047 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$ , скляного волокна  $\lambda = 0,038 \dots 0,042 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$  [ 16 ]:

товщина ізоляції базальтового волокна:

$$\delta = \frac{\lambda}{q_1} \cdot (t_a - t_{\text{ноє}}), \text{м},$$

#### 4 Визначення висоти димаря та його діаметра для трубчатої печі

Скористаємося алгоритмом за авторами [1, 2].

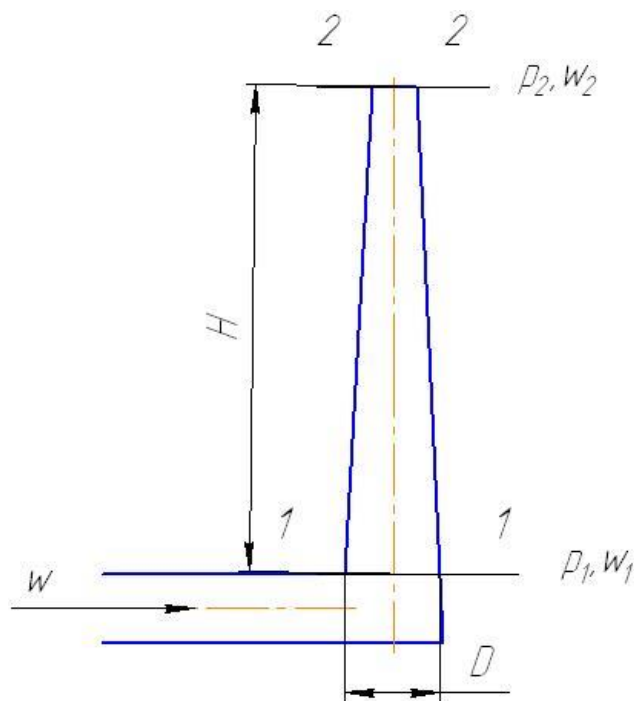


Рисунок 3 – Схема димаря

Температура газів на виході з димаря приймається на  $20\text{ }^\circ\text{C}$  менше від температури входу у димар  $t_{\text{дм}}$ , тоді середня температура у димарі:

$$t_{\text{сеп}} = \frac{(t_{\text{дг}} + t_{\text{вих}})}{2}, \text{ }^\circ\text{C}.$$

Густина димових газів при  $t_{\text{сеп}}$ :

$$\rho_{\text{сеп}}^t = \frac{\rho_{\text{дг}}}{\left(1 + \frac{1}{273} t_{\text{сеп}}\right)}, \text{ кг/м}^3$$

Масова швидкість газу в димарі, знаходиться з виразу:

$$U_{\text{мп}} = u_{\text{дм}} \cdot \rho_{\text{сеп}}^{t_{\text{сеп}}} = u_{\text{дм}} \cdot \rho_{\text{сеп}}^{370}, \text{ кг/(м}^2\cdot\text{с)},$$

де  $u_{\text{дм}}$  – лінійна швидкості газів на вході у димар (при природній тязі приймається  $7\text{ м/с}$ ).

Діаметр димаря визначається за залежністю

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot G}{\pi \cdot U_{\text{мп}}}}, \text{ м,}$$

Гідравлічний опір на тертя в димаря визначається за формулою Дарсі-Вейсбаха:

$$\Delta P_{тер} = \xi \frac{H}{D} \cdot \frac{U_{mp}}{2 \cdot g \cdot \rho_{сер}^t} =, Па.$$

де  $H$  – висота димаря, попередньо приймається  $H = 15 м$ ,

$\xi$  – коефіцієнт гідравлічного опору, приймається  $\xi = 0,5$ .

а потім перераховується за залежністю:

$$H = \frac{\sum \Delta P}{(\rho_{нов} - \rho_{сер})g}, м$$

Сумарний гідравлічний опір знаходиться за залежністю:

$$\sum \Delta P = \Delta P_{кон} + \Delta P_{рад} + \Delta P_z + \Delta P_m + \Delta P_{тер}, Па$$

Тоді висота димаря:

$$H = \frac{\sum \Delta P}{\rho_{дз}^{15} \left( \frac{273}{t_{нов}} - \frac{273}{t_{сер}} \right) g}, м$$

## **2 ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ РОЗРАХУНКОВОЇ РОБОТИ**

### **2.1 Завдання на розрахункову роботу**

Завдання видається кожному студенту особисто протягом перших двох тижнів навчання. перелік завдань наведено у додатку А.

Текст завдання підписується студентом, що буде виконувати розрахункову роботу та керівником розрахункової роботи.

### **2.2 Склад, обсяг і структура розрахункової роботи**

Розрахункова робота є текстовим конструкторським документом.

Розрахункова робота складається з розділів, наведених у зразку змісту (Додаток Б). орієнтовний обсяг пояснювальної записки 20...40 аркушів формату А4.

### **2.3 Вказівки до виконання розділів розрахункової роботи**

При виконанні розділів, необхідно звернути увагу на:

Розділ «**Вступ**».

У вступі коротко надається інформація про актуальність насосного обладнання та точність визначення витрат на переміщення рідин і газів. Далі у відповідності до змісту роботи ставляться мета та задачі розробки. В кінці вступу вказується, коли було видано завдання на проектування.

Приблизний обсяг розділу – 1 аркуш.

## Розділ «Завдання»

У розділі наводиться завдання з вказівкою величин цифрами, відповідно до варіанту та схема трубопроводів до розрахунку насоса з довжинами трубопроводів (Приклад 1).

### Приклад 1

#### **Завдання до розрахункової роботи**

Визначити розміри елементів печі

Джерело тепла – паливо, згідно таблиці 1, ...

... Далі наводяться початкові данні ...

### **Текст пояснювальної записки**

У пояснювальній записці наводяться всі розрахунки згідно алгоритму розрахунку.

У висновках наводяться параметри вибраного насосу. Приблизний обсяг пояснювальної записки – 15...20 аркушів.

### Підрозділ «Висновки»

У висновку наводяться аналіз результатів розрахунку. Приблизний обсяг розділу – 1 аркуш.

## **2.4 Структура пояснювальної записки**

Пояснювальна записка виконується згідно вимог ГОСТ 2.105-95.

Пояснювальна записка для курсового проекту розпочинається титульним листом з надписом “Розрахункова робота” (додаток А), наступним аркушем є “Завдання” (додаток Б). Далі розміщується аркуш з заголовком “Зміст” (додаток В). У Додатку Г наводиться приклад оформлення пояснювальної записки. Позиція у основному надписі розрахункової роботи, позначена 001 – це номер варіанта, (наприклад 002).

## **2.5 Вимоги до форматування пояснювальних записок**

Текст пояснювальної записки розділяють на розділи і підрозділи, відповідно до змісту.

Розділи повинні мати порядкові номери в межах усього документа (частини), позначені арабськими цифрами з крапкою. Підрозділи повинні мати нумерацію в межах кожного розділу. Номери підрозділів складаються з номерів розділів або підрозділу, розділених крапкою. Наприкінці номера розділу або підрозділу крапка не ставиться. Розділи, як і підрозділи, можуть складатися з декількох пунктів.

Найменування розділів повинні бути короткими. Найменування розділів і підрозділів записують у вигляді заголовків з абзацу прописними літерами (окрім першої великої літери) напівжирним форматом літер (Приклад 2). Використання форматування курсивом, підкреслення та переноси слів у заголовках не допускаються. Крапку наприкінці заголовка не ставлять. Якщо заголовок складається з двох речень, їх розділяють крапкою. Розташовувати назву розділу, підрозділу та тексту на різних сторінках забороняється.

Відстань між заголовком розділу або підрозділу і текстом повинна бути у 3 інтервали. Відстань між заголовками розділу і підрозділу – 1,5 інтервали. Кожен розділ пояснювальної записки починають з нового листа (сторінки).

Відстань між попереднім підрозділом та наступним заголовком підрозділу повинна бути 3 інтервали.

Нумерація сторінок повинна бути наскрізна для всієї записки, включаючи додатки.

## Приклад 2. Оформлення заголовку

**1** **Визначення кількості тепла, що передалось випромінюванням матеріалу**

Мета розрахунку...

## 2.6 Виклад тексту розрахункової роботи

Повне найменування назви розрахункової роботи на титульному листі, в основному написі і при першому згадуванні в тексті документа повинне бути однаковим з найменуванням його в основному конструкторському документі (специфікації). Найменування, що наводяться в тексті пояснювальної записки і на ілюстраціях, повинні бути однаковими.

## 2.7 Оформлення розрахунків

Необхідні розрахунки апаратів визначаються керівником. **Всі величини подаються в системі СІ.** В кожному підрозділі розрахунок складається за такою схемою (Приклад 3):

1. Мета розрахунку з вказівкою, що потрібно визначити.
2. Розрахункова схема або ескіз виробу (у довільному масштабі).
3. Вхідні данні.



4. Умови розрахунку.
5. Розрахунок.
6. Висновки, відповідно до мети.

### Приклад 3

#### 3 Розрахунок товщини ізоляції печі

Мета: підібрати потрібну товщину ізоляції печі.

Початкові данні:

швидкість пічних газів

$$W_{\Gamma}^t = 0,7 \text{ м/с}$$

...

Скористаємося алгоритмом за авторами [1, 2].

Схема ізоляції печі зображена на рисунку 2.

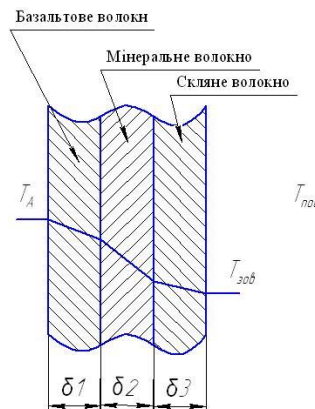


Рисунок 2 – Схема ізоляції печі

Коефіцієнт тепловіддачі від зовнішньої поверхні повітря за рахунок випромінювання та конвекції для неізольованої поверхні  $\alpha_2$ ,  $\text{Вт/м}^2 \cdot \text{К}$  орієнтовно можна визначити за залежністю:

$$\alpha_2 = 9,74 + 0,07(t_2 - t_{нов}) = 9,74 + 0,07(313 - 293) = 11,14 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$$

...

Висновки: найменша товщина у ізоляції з базальтового волокна, тому приймаємо ізоляцію з базальтового волокна товщиною 0,13 м.

При наведенні алгоритмів та комп'ютерних програм матеріал викладається у такій послідовності:

1. Опис математичної моделі та алгоритм розрахунку.
2. Алгоритмічна-схема та її опис.
3. Данні для розрахунку.
4. Програма.
5. Результати розрахунку на ЕОМ.
6. Висновки за результатами розрахунку на ЕОМ.

Алгоритмічна-схема, її опис та програма виноситься у додаток.

## **2.8 Рекомендації щодо порядку захисту розрахункової роботи**

Зброшурована пояснювальна записка повинна містити усі необхідні розрахунки.

Розрахункова робота захищається після перевірки на керівником розрахункової роботи всіх розділів, про що свідчать підпис керівника на титульному аркуші пояснювальної записки.

## ПЕРЕЛІК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. В. І. Саранчук, М. О. Ільяшов, В. В. Ошовський, В. С. Білецький. Хімія і фізика горючих копалин. — Донецьк: Східний видавничий дім, 2008. — С. 600. — ISBN 978-966-317-024-4.
2. Саранчук В.І., Ільяшов М.О., Ошовський В.В., Білецький В.С. О 75 Основи хімії і фізики горючих копалин. - Донецьк: Східний видавничий дім, 2008. – с. 640.
3. Бельский В.И., Сергеев Б.В. Промислові печі та труби. Навч. посібник для технікумів. Вид. 2-е, аипр та доп. М., Стройиздат. 1974. 301 с.
4. Ткаченко О. О. Високотемпературні процеси та установки. : підручник Ч. 1. – 2-ге вид. – Х. Видавництво «Ранок». 2008. – 336 с.: іл.
5. Ткаченко О. О. Високотемпературні процеси та установки. : підручник Ч. 2. – 2-ге вид. – Х. Видавництво «Ранок». 2008. – 160 с.: іл.
6. Процеси первинної газо- нафтопереробки. Процеси первинної газо-нафтопереробки [Електронний ресурс]: навчальний посібник / НТУУ «КПІ» ; уклад. А. Р. Степанюк. – Електронні текстові дані (1 файл: 291 Мбайт). – Київ: НТУУ «КПІ», 2013. – 126 с. – Назва з екрана. – Доступ: <http://ci.kpi.ua/metodopen> 126 с.
7. Основні залежності та приклади розрахунків теплообмінних апаратів друк [Електронний ресурс]: навчальний посібник для студентів, які навчаються за напрямком „Машинобудування” спеціальність "Обладнання хімічних виробництв та підприємств будівельних матеріалів"/ НТУУ „КПІ”/ уклад. Воронін Л.Г., Ружинська Л.І - Електронні текстові дані (1 файл: 2,50 Мбайт). – Київ: НТУУ «КПІ», 2011. - Назва з екрана <http://library.kpi.ua:8080/handle/123456789/697> від 15.02.2011 р. 68 с.
8. Корнієнко Я.М. Процеси та обладнання хімічної технології 1: підручник /Я.М. Корнієнко, Ю.Ю. Лукач, І.О. Мікульонок, В.Л. Ракицький, Г.Л. Рябцев – К. :НТУУ „КПІ”, 2011 – Ч.1 – 300 с.

9. Конспект лекцій з дисципліни «Пічне обладнання у хімічних процесах» для студентів напряму 6.050503 «Машинобудування» [Електронний ресурс] / НТУУ «КПІ» ; уклад. А. Р. Степанюк. – Електронні текстові данні (1 файл: 2,32 Мбайт). – Київ: НТУУ «КПІ», 2016. – 132 с. – Назва з екрана. – Доступ: <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/15245> Свідоцтво ІХФ № 05/06-1

10. В. І. Частухін, В. В. Частухін. Паливо і теорія горіння. — Київ: Вища школа, 1989. — 180 с.

11. Процеси та обладнання хімічних технологій – 1. Базові принципи теорії тепломасообміну: навчальний посібник [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 133 «Галузеве машинобудування», спеціалізації «Інжиніринг, обладнання та технології хімічних та нафтопереробних виробництв» / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: А.Р. Степанюк, С.В. Гулієнко – Електронні текстові данні (1 файл: 3,57 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – 160 с. Доступ з екрану: <http://login.kpi.ua>

12. Процеси та обладнання хімічних технологій – 1. Базові принципи теорії тепломасообміну: лабораторний практикум [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 133 «Галузеве машинобудування», спеціалізації «Інжиніринг, обладнання та технології хімічних та нафтопереробних виробництв» / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: А.Р. Степанюк, С.В. Гулієнко – Електронні текстові данні (1 файл: 2,59 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – 69 с. Доступ з екрану: <http://login.kpi.ua>

13. Методичні вказівки до проведення практичних робіт з дисципліни «Пічне обладнання у хімічних процесах» для студентів напряму 6.050503 «Машинобудування» [Електронний ресурс] / НТУУ «КПІ» ; уклад. А. Р. Степанюк. – Електронні текстові данні (1 файл: 1,58 Мбайт). – Київ: НТУУ «КПІ», 2016. – 48 с. – Назва з екрана. – Доступ: <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/15246> Свідоцтво ІХФ № 05/06-12

14. В. І. Саранчук, М. О. Ільяшов, В. В. Ошовський, В. С. Білецький. Хімія і фізика горючих копалин. — Донецьк: Східний видавничий дім, 2008. — с. 600. ISBN 978-966-317-024-4

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Конспект лекцій з дисципліни «Пічне обладнання у хімічних процесах» для студентів напряму 6.050503 «Машинобудування» [Електронний ресурс] / НТУУ «КПІ» ; уклад. А. Р. Степанюк. – Електронні текстові данні (1 файл: 2,32 Мбайт). – Київ: НТУУ «КПІ», 2016. – 132 с. – Назва з екрана. – Доступ: <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/15245> Свідоцтво ІХФ № 05/06-1

2. Спеціальні методи термічної підготовки: практикум [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 133 Галузеве машинобудування, освітньої професійна програма бакалаврів «Комп'ютерно-інтегровані технології проектування обладнання хімічної інженерії» / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: Степанюк А.Р. – Електронні текстові данні (1 файл: 5,14 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. – 113 с. Назва з екрана. – Доступ: [https://ci.kpi.ua/METODA/New\\_book/%D0%9F%D0%B5%D1%87%D1%96\\_%D0%B4%D0%BB%D1%8F\\_4\\_%D0%BA%D1%83%D1%80%D1%81%D1%83\\_%D0%BF%D1%80%D0%B0%D0%BA%D1%82%D0%B8%D0%BA%D0%B0\\_2022\\_%D1%80\\_%D0%B2%D0%B0%D1%80\\_20.pdf](https://ci.kpi.ua/METODA/New_book/%D0%9F%D0%B5%D1%87%D1%96_%D0%B4%D0%BB%D1%8F_4_%D0%BA%D1%83%D1%80%D1%81%D1%83_%D0%BF%D1%80%D0%B0%D0%BA%D1%82%D0%B8%D0%BA%D0%B0_2022_%D1%80_%D0%B2%D0%B0%D1%80_20.pdf)

Додаток А Зразок титульного листа розрахункової роботи

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
“КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО”**

**Інженерно-хімічний факультет  
Кафедра машин та апаратів хімічних і нафтопереробних виробництв**

**РОЗРАХУНКОВА РОБОТА**

з дисципліни:

**СПЕЦІАЛЬНІ МЕТОДИ ТЕРМІЧНОЇ ПІДГОТОВКИ**

на тему: **Визначення розмірів елементів печі**

Студент III курсу, групи ЛН-11  
\_\_\_\_\_ **Івана ІВАНОВА**

Галузь знань 13 «Механічна інженерія»  
Спеціальність 133 «Галузеве  
машинобудування»  
Освітня програма Комп'ютерно-  
інтегровані технології проектування  
обладнання хімічної інженерії

Консультант: доцент, к.т.н.  
\_\_\_\_\_ **Андрій СТЕПАНЮК**

Кількість балів: \_\_\_\_\_

Київ 2024

## Додаток Б Завдання до розрахункової роботи.

### Завдання до розрахункової роботи

Визначити розміри елементів печі

Джерело тепла – паливо, згідно таблиці 1,

ступінь чорноти

$$\xi_z = 0,5;$$

ступінь чорноти матеріалу

$$\xi_m = 0,9;$$

теоретична температура горіння газу

$$T_m = 1500 + 0,01 \cdot N_{\text{вар}}, K;$$

температура газів, що виходять з печі

$$T^g_z = 500 + 0,01 \cdot N_{\text{вар}}, K;$$

початкова температура матеріалу

$$T^n_m = 250 + 0,01 \cdot N_{\text{вар}}, K;$$

кінцева температура матеріалу

$$T^k_m = 800 + 0,01 \cdot N_{\text{вар}}, K;$$

поверхня матеріалу

$$F_m = 200 + 0,01 \cdot N_{\text{вар}}, m^2;$$

поверхня матеріалу, яка сприймає променеву

енергію

$$F_n = 64 + 0,01 \cdot N_{\text{вар}}, m^2;$$

сумарна внутрішня поверхня кладки

$$F_k = 70 + 0,01 \cdot N_{\text{вар}}, m^2.$$

еквівалентний діаметр трубопроводу,

що нагрівається у печі

$$d_{\text{екв}} = 0,1 \text{ м};$$

швидкість пічних газів

$$W_{\Gamma}^t = 0,7 \text{ м/с}$$

температура неізолюваної стінки апарата

$$t_a = 800 + 0,01 \cdot N_{\text{вар}}, K;$$

температура зовнішньої поверхні ізоляції

$$t_2 = 313; + 0,01 \cdot N_{\text{вар}}, K;$$

температура повітря

$$t_{\text{нов}} = 293 \text{ K} + 0,01 \cdot N_{\text{вар}}, \cdot$$

ізоляція базальтове волокно, товщина її вибирається за умови

меншення втрат тепла у довкілля на

$$85\% (\eta_{\text{ізол}} = 0,85).$$

густина димових газів

$$\rho_{\text{дг}}^{15} = 1,25 \text{ кг} / \text{м}^3.$$

гідравлічні опори:

конвективної частини печі

$$\Delta P_{\text{кон}} = 4800 + 0,01 \cdot N_{\text{вар}}, \text{Па},$$

радіаційної частини печі

$$\Delta P_{\text{рад}} = 3600 + 0,01 \cdot N_{\text{вар}}, \text{Па},$$

газоходів

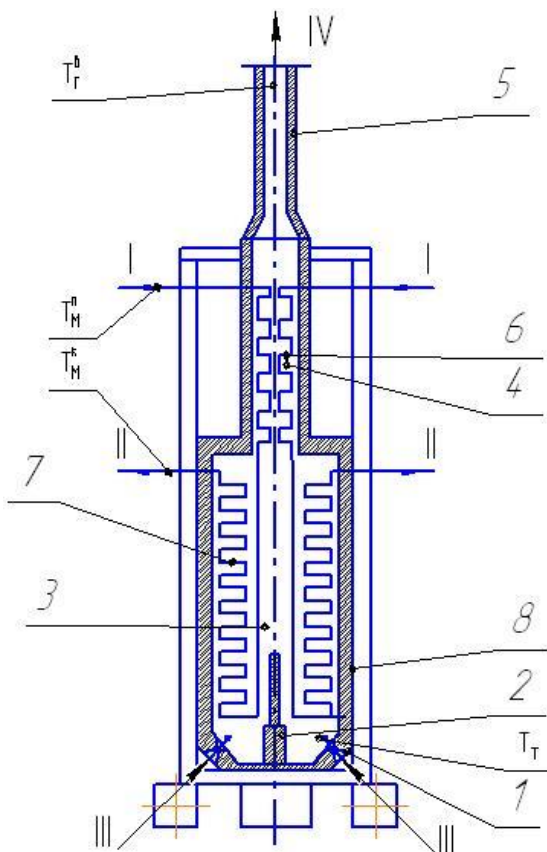
$$\Delta P_z = 5200 + 0,01 \cdot N_{\text{вар}}, \text{Па}.$$

Питома теплота згоряння палива наведена у таблиці 1 [16].

**Таблиця 1– Питома теплота згоряння палива**

Варіанти			Паливо	Питома теплота згоряння, кДж/кг
1	11	21	Сланцевий газ	14500
2	12	22	Етиловий спирт	29000
3	13	23	Природний газ	33500
4	14	24	Мазут	40600
5	15	25	Нафта	43000
6	16	26	Гас	43000
7	17	27	Бензин	44000
8	18	28	Скrapлений газ	45200
9	19	29	Пропан	45570
10	20	30	Метан	50030

Схема трубчастої печі з об'ємно-настильним спалюванням палива наведена на рисунку 1.



I - форсунка; 2 - настільна стінка; 3 - радіаційна камера (паливна камера); 4 - камера конвекції; 5 - димар; 6 - змійовик конвекційних труб; 7 - змійовик радіантних труб; 8 - футерування.

Рисунок 1 – Схема трубчастої печі з об'ємно-настильним спалюванням палива

Група	Дата видачі	Здобувач	Підпис здобувача



## Додаток В Приклад оформлення змісту розрахункової роботи

<u>Зміст</u>			
Вступ			4
1	Визначення кількості тепла, що передалось випромінюванням матеріалу		5
2	Визначення витрат повітря та палива		7
3	Розрахунок товщини ізоляції печі		8
4	Визначення висоти димаря та його діаметра для трубчатої печі		10
	Висновки		12
	ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ		13
	<u>Арк.</u>	<u>№ докум.</u>	<u>Підпис</u> <u>Дата</u>
<u>Розробив</u>	Корюкаєв		
<u>Перевірів</u>	Степанюк		
<u>Затв.</u>			
Визначення розмірів елементів печі		<u>Літ.</u>	<u>Арку</u> <u>Аркушів</u>
			1 28
		КПІ ім. Ігоря Сікорського ІХФ, каф. МАХНВ	

## Додаток Г Приклад оформлення текстової частини розрахункової роботи

### Вступ

Печі широко використовують в усіх областях промисловості: в хімічній наприклад для обпалювання мідного колчедану при виробництві з нього сірчаної кислоти, для обпалювання сірчаноокислотного глинозему – при виробництві соди, аміаку, фосфатних добрив, вугільних матеріалів, шихти, коксу, тощо. В нафтопереробній промисловості та промисловості органічного синтезу, де основними технологічними агрегатами являються трубчасті печі для крекінгу, піролізу та інших процесів. Тому необхідно навчитися визначати основні геометричні розміри елементів трубчастої печі.

Мето роботи є визначення основних геометричних розмірів елементів печі.

Задачі розрахункової роботи:

- Визначення кількості тепла, що передалось випромінюванням матеріалу.
- Визначення витрат повітря та палива.
- Розрахунок товщини ізоляції печі.
- Визначення висоти димаря та його діаметра для трубчастої печі.

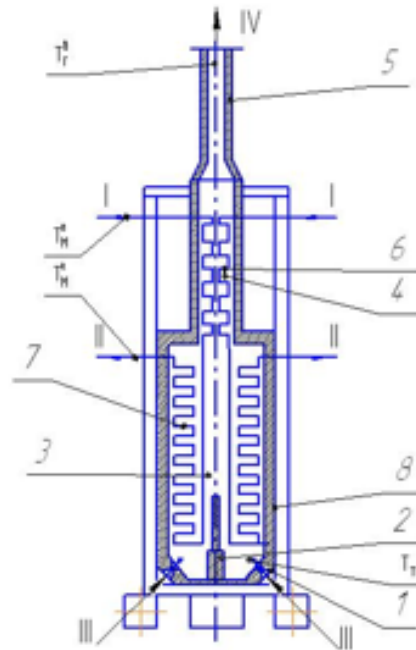
						ЛН11.065451.001ПЗ	Арк.
							5
Зм.	Арк.	№ док.	Підпис	Дат			

## 1 Визначення кількості тепла, що передалось випромінюванням матеріалу

Мета: визначити витрати повітря та палива.

Скористаємося алгоритмом за авторами [1, 2].

Схема трубчастої печі з об'ємно-настильним спалюванням палива наведена на рисунку 1



I - форсунка; 2 - настільна стінка; 3 - радіаційна камера (паливна камера); 4 - камера конвекції; 5 - димар; 6 - змієвик конвекційних труб; 7 - змієвик радіаційних труб; 8 - футерування.

Рисунок 1 – Схема трубчастої печі з об'ємно-настильним спалюванням палива

Початкові данні:

джерело тепла

природний газ;

ступінь чорноти

$\xi_s = 0,5;$

ступінь чорноти матеріалу

$\xi_m = 0,9;$

теоретична температура горіння газу

$T_m = 1800 K;$

температура газів, що виходять з печі

$T_g^s = 600 K;$

								Арк.
								5
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат	ЛН11.06545.1.001 ПЗ			

початкова температура матеріалу	$T_{\text{м}}^0 = 300 \text{ K};$
кінцева температура матеріалу	$T_{\text{м}}^{\text{к}} = 1000 \text{ K};$
поверхня матеріалу	$F_{\text{м}} = 200 \text{ м}^2;$
поверхня матеріалу, яка сприймає променеву енергію	$F_{\text{к}} = 64 \text{ м}^2;$
сумарна внутрішня поверхня кладки	$F_{\text{к}} = 64 \text{ м}^2.$
еквівалентний діаметр шматків матеріалу, що нагріваються у печі	$d_{\text{екв}} = 0,1 \text{ м}.$

Кількість тепла, що отримує матеріал за одиницю часу (потужність передачі тепла) за рахунок випромінювання теплової енергії пічним газом і кладкою печі, дорівнює:

$$Q_{\text{в+к}}^{\text{н}} = C_{\text{в}} \cdot F_{\text{в}} \cdot \theta \cdot \xi,$$

де:  $C_{\text{в}} = C_{\text{в}} \cdot \xi_{\text{м}} \cdot \xi_{\text{г}} = 5,67 \cdot 0,9 \cdot 0,39 = 1,99 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{K}^4)$  – коефіцієнт видимого випромінювання;

$C_{\text{в}} = 5,67 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{K}^4)$  – коефіцієнт чорноти абсолютно чорного тіла,

$$\xi_{\text{г}} = \frac{\omega + 1 - \xi_{\text{в}}}{\beta \frac{1 + \xi_{\text{в}}}{\xi_{\text{г}}}} = \frac{1 + 1 - 0,5}{0,95 \frac{1 + 0,5}{0,5}} = 0,39 \text{ – набута степінь чорноти пічного простору,}$$

$\beta = \xi_{\text{м}} + \xi_{\text{г}}(1 - \xi_{\text{м}}) = 0,9 + 0,5(1 - 0,9) = 0,95$  – ступінь чорноти (відносна випромінювальна здатність) газу;

$\omega = \frac{F_{\text{к}}}{F_{\text{в}}} = \frac{64}{64} = 1$  – коефіцієнт, що є відношенням променесприймаючої

поверхні виробів до сумарної внутрішньої поверхні кладки,

$$\theta = \sqrt{\left(\left(\frac{T_{\text{г}}}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_{\text{в}}}{100}\right)^4\right) \cdot \left(\left(\frac{T_{\text{г}}}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_{\text{в}}}{100}\right)^4\right)} = \sqrt{\left(\left(\frac{1800}{100}\right)^4 - \left(\frac{1000}{100}\right)^4\right) \cdot \left(\left(\frac{600}{100}\right)^4 - \left(\frac{300}{100}\right)^4\right)} = 10740 \text{ K}^4 \text{, –}$$

температура вechі;

$\xi = 1$ , – коефіцієнт, що враховує степінь забруднення поверхні  $F_{\text{в}}$ .

Тоді:

$$Q_{\text{в+к}}^{\text{н}} = C_{\text{в}} \cdot F_{\text{в}} \cdot \theta \cdot \xi = 1,99 \cdot 64 \cdot 10740 \cdot 1 = 1368200 \text{ Вт} = 1368 \text{ кВт}$$

Коефіцієнт тепловіддачі випромінюванням дорівнює:

						ЛН11.065451.001ПЗ	Арк. 5
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат			

$$\alpha_k = \frac{Q_{\text{ст}}}{F_{\text{ст}} \cdot \Delta T_{\text{ст}}} = \frac{1368 \cdot 10^3}{200 \cdot 550} = 12,43 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$$

де  $\Delta T_{\text{ст}} = \frac{T_{\text{Г}} + T_{\text{г}}^{\text{н}}}{2} - \frac{T_{\text{м}}^{\text{к}} + T_{\text{м}}^{\text{н}}}{2} = \frac{1800 + 600}{2} - \frac{1000 + 300}{2} = 550 \text{ К}$  – середня різниця температур.

Коефіцієнт тепловіддачі за рахунок конвекції при швидкості пічних газів  $W_{\text{г}} = 0,7 \text{ м/с}$  у вільному перерізі камери визначається за виразом:

$$\alpha_k = \frac{\lambda_{\text{г}}' \cdot Nu}{d_{\text{см}}}$$

де  $Nu = 0,61 Re^{0,67}$  – критерій Нусельта;

Визначимо середню температуру пічного газу

$$t_{\text{г}}^{\text{ср}} = \frac{T_{\text{Г}} + T_{\text{г}}^{\text{н}}}{2} - 273 = \frac{1800 + 600}{2} - 273 = 927 \text{ К}.$$

За цієї температури визначимо теплофізичні властивості димових газів.

Динамічна в'язкість пічного газу:

$$\mu' = 2,91 \cdot 10^{-8} t_{\text{г}}^{\text{ср}} + 1,62 \cdot 10^{-5} = 2,91 \cdot 10^{-8} \cdot 927 + 1,62 \cdot 10^{-5} = 4,32 \cdot 10^{-5} \text{ Па} \cdot \text{с}.$$

густина пічного газу:

$$\rho_{\text{г}}' = \rho_{\text{г}}^{\text{н}} \left( \frac{273}{273 + t_{\text{г}}^{\text{ср}}} \right) = 1,3 \left( \frac{273}{273 + 927} \right) = 0,30 \text{ кг/м}^3.$$

Теплопровідність пічного газу:

$$\lambda_{\text{г}}' = 9,3 \cdot 10^{-5} \cdot t_{\text{г}}^{\text{ср}} + 2,32 \cdot 10^{-2} = 9,3 \cdot 10^{-5} \cdot 927 + 2,32 \cdot 10^{-2} = 10,9 \cdot 10^{-2} \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}.$$

Тоді значення критерію Рейнольдса:

$$Re = \frac{W_{\text{г}}' \cdot \rho_{\text{г}}' \cdot d_{\text{см}}}{\mu_{\text{г}}'} = \frac{0,7 \cdot 0,3 \cdot 0,1}{4,32 \cdot 10^{-5}} = 483.$$

Значення критерію Нусельта:

$$Nu = 0,61 Re^{0,67} = 0,61 \cdot 483^{0,67} = 62,8.$$

Коефіцієнт тепловіддачі від газу до матеріалу:

$$\alpha_k = \frac{Nu \cdot \lambda_{\text{г}}'}{d_{\text{см}}} = \frac{62,8 \cdot 10,9 \cdot 10^{-2}}{0,1} = 68,5 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}.$$

Кількість тепла, що передається матеріалу конвекцією:

					ЛН11.065451.001ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		5

$$Q_c = \alpha_c \cdot F_M \cdot \Delta T_{cp} = 68,5 \cdot 200 \cdot 550 = 7535000 \text{ Вт} = 7535 \text{ кВт.}$$

Загальна кількість підведеного тепла:

$$Q = Q_{i+k} + Q_c = 1368 + 7535 = 8903 \text{ кВт.}$$

Висновки: Загальна кількість підведеного тепла  $Q = 8903 \text{ кВт.}$

					ЛН11.065451.001ПЗ	Арк.
						5
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

## 2 Визначення витрат повітря та палива

Мета: визначити витрати повітря та палива.

Початкові данні:

загальна кількість підведеного тепла,  $Q, \text{кВт}$ , 8903

питома теплота згоряння палива,  $q_{\text{пал}}, \text{кДж/кг}$ , 14500

Скористаємося алгоритмом за авторами [1, 2].

Витрати палива:

$$g = \frac{Q}{q_{\text{пал}}} = \frac{8903 \cdot 10^3}{14500 \cdot 10^3} = 0,614 \text{ кг/с.}$$

Приймаємо коефіцієнт надлишку повітря –  $\alpha_2 = 1,1$ .

Фізичним теплом палива і повітря знехтуємо, тобто

$$q_{\text{флз}}^{\text{п+пов}} = c_{\text{п}} \cdot t_{\text{п}} + c_{\text{пов}} \cdot t_{\text{пов}} \cdot \alpha \cdot L_0 = 0.$$

Питомі витрати повітря можна обчислити за емпіричним рівнянням:

$$V_0 = \left( \frac{0,24 \cdot Q_{\text{пал}}}{1000} + 0,5 \right) \cdot \alpha_2 = \left( \frac{0,24 \cdot 11900}{1000} + 0,5 \right) \cdot 1,1 = 3,78 \text{ м}^3 / \text{кг палива}$$

Витрати повітря:

$$G = V_0 \cdot g = 3,78 \cdot 0,614 = 2,32 \text{ кг/с.}$$

Висновки: витрати палива  $g = 0,614 \text{ кг/с}$ , витрати повітря  $G = 2,32 \text{ кг/с}$ .

### 3 Розрахунок товщини ізоляції печі

Мета: підібрати потрібну товщину ізоляції печі.

Початкові данні:

швидкість пічних газів

$$W_{г'} = 0,7 \text{ м/с}$$

температура неізолюваної стінки апарата

$$t_a = 800 + 0,01 \cdot N_{\text{апр}}, \text{ К};$$

температура зовнішньої поверхні ізоляції

$$t_2 = 313 + 0,01 \cdot N_{\text{апр}}, \text{ К};$$

температура повітря

$$t_{\text{пов}} = 293 \text{ К} + 0,01 \cdot N_{\text{апр}},$$

Товщина ізоляції вибирається за умови меншення втрат тепла у доквілля на 85% ( $\eta_{\text{докл}} = 0,85$ ).

Скористаємося алгоритмом за авторами [1, 2].

Схема ізоляції печі зображена на рисунку 2.

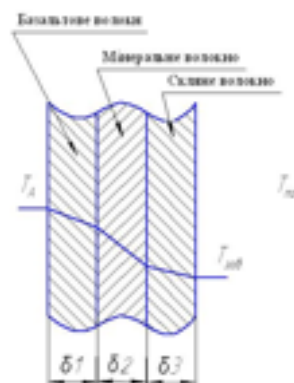


Рисунок 2 – Схема ізоляції печі

Коефіцієнт тепловіддачі від зовнішньої поверхні повітря за рахунок випромінювання та конвекції для неізолюваної поверхні  $\alpha_2$ ,  $\text{Вт/м}^2 \cdot \text{К}$  орієнтовно можна визначити за залежністю:

$$\alpha_2 = 9,74 + 0,07(t_2 - t_{\text{пов}}) = 9,74 + 0,07(313 - 293) = 11,14 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$$

Питомий тепловий потік через стінку:

$$q_1 = \alpha_2 \cdot (t_2 - t_{\text{пов}}) = 11,14 \cdot (313 - 293) = 222,8 \text{ Вт/м}^2$$

					ЛН11.065451.001ПЗ	Арк. 5
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		



Вважаючи, що основний термічний опір дає ізоляція, можна записати:

$$q_1 = K(t_a - t_{\text{зовн}}) \approx \frac{\lambda}{\delta} (t_a - t_{\text{зовн}}) \text{ Вт/м}^2,$$

звідки визначаємо товщину ізоляції, враховуючи, що теплопровідність базальтового волокна знаходиться у межах  $\lambda = 0,031 \dots 0,034 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ , мінерального волокна  $\lambda = 0,04 \dots 0,047 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ , скляного волокна  $\lambda = 0,038 \dots 0,042 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$  [ 16 ]:

товщина ізоляції базальтового волокна:

$$\delta = \frac{\lambda}{q_1} \cdot (t_a - t_{\text{зовн}}) = \frac{0,032}{222,8} \cdot (923 - 20) = 0,129 \text{ м},$$

Висновки: найменша товщина у ізоляції з базальтового волокна, тому приймаємо ізоляцію з базальтового волокна товщиною 0,13 м.

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат

ЛН11.065451.001ПЗ

Арк.  
5

#### 4 Визначення висоти димаря та його діаметра для трубчатої печі

Мета: визначення висоти та діаметра димаря для трубчатої печі.

Схема димаря наведена на [рисунку 3](#).

Початкові данні:

густина димових газів  $\rho_{\text{дв}}^{15} = 1,25 \text{ кг} / \text{м}^3$ .

гідравлічні опори:

конвективної частини печі  $\Delta P_{\text{кон}} = 4800$

$+ 0,01 \cdot N_{\text{нар}}, \text{ Па},$

радіаційної частини печі  $\Delta P_{\text{рад}} = 3600$

$+ 0,01 \cdot N_{\text{нар}}, \text{ Па},$

газоходів  $\Delta P_{\text{г}} = 5200 + 0,01 \cdot N_{\text{нар}}, \text{ Па}.$

Скористаємося алгоритмом за авторами [1, 2].

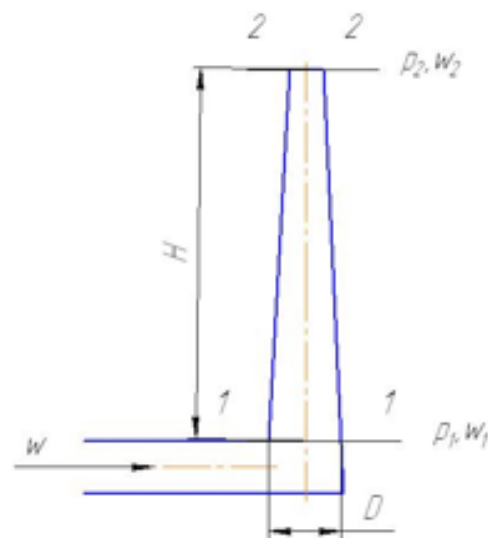


Рисунок 3 – Схема димаря

Температура газів на виході з димаря приймається на  $20^\circ\text{C}$  менше від температури входу у димар  $t_{\text{дв}}$ , тоді середня температура у димарі:

$$t_{\text{ср}} = \frac{(t_{\text{дв}} + t_{\text{вх}})}{2} = \frac{380 + (380 - 20)}{2} = 370^\circ\text{C}.$$

						ЛН11.065451.001ПЗ	Арк. 5
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат			

Густина димових газів при  $t_{сер}$ :

$$\rho'_{сер} = \frac{\rho_{0г}}{\left(1 + \frac{1}{273} t_{сер}\right)} = \frac{1,25}{\left(1 + \frac{1}{273} 370\right)} = 0,5 \text{ кг/м}^3$$

Масова швидкість газу в димарі, знаходиться з виразу:

$$U_{сер} = u_{0г} \cdot \rho'_{сер} = u_{0г} \cdot \rho_{сер}^{370} = 7 \cdot 0,5 = 3,5 \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{с)},$$

де  $u_{0г}$  – лінійна швидкості газів на вході у димар (при природній тязі приймається 7 м/с).

Діаметр димаря визначається за залежністю

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot G}{\pi \cdot U_{сер}}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 2,32}{3,14 \cdot 3,5}} = 0,91 \text{ м},$$

Приймаємо діаметр димаря 1 м.

Гідравлічний опір на тертя в димаря визначається за формулою Дарсі-Вейсбаха:

$$\Delta P_{сер} = \xi \frac{H}{D} \cdot \frac{U_{сер}}{2 \cdot g \cdot \rho'_{сер}} = 0,5 \frac{15}{0,26} \cdot \frac{3,5}{2 \cdot 9,81 \cdot 0,5} = 5,33 \text{ Па.}$$

де  $H$  – висота димаря, попередньо приймається  $H = 15 \text{ м}$ ,

$\xi$  – коефіцієнт гідравлічного опору, приймається  $\xi = 0,5$ .

а потім перераховується за залежністю:

$$H = \frac{\sum \Delta P}{(\rho_{0г} - \rho_{сер}) g} = \frac{\sum \Delta P}{1,293 \left( \frac{273}{t_{0г}} - \frac{273}{t_{сер}} \right) g},$$

Сумарний гідравлічний опір знаходиться за залежністю:

$$\begin{aligned} \sum \Delta P &= \Delta P_{0г} + \Delta P_{рад} + \Delta P_z + \Delta P_{ш} + \Delta P_{сер} = \\ &= 18 + 15 + 16 + 19 + 5,33 = 73,2 \text{ Па} \end{aligned}$$

Тоді висота димаря:

$$H = \frac{\sum \Delta P}{\rho_{0г} \left( \frac{273}{t_{0г}} - \frac{273}{t_{сер}} \right) g} = \frac{73,2}{1,25 \left( \frac{273}{293} - \frac{273}{370} \right) 9,81} = 34,4 \text{ м}$$

Приймаємо димар, висотою 35 м

Висновки: приймаємо димар, висотою 35 м, діаметром 5 м.

					ЛН11.065451.001ПЗ	Арк.
						5
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

## Висновки

За результатами розрахунків кількість палива, що необхідно спалювати в печі для підтримання технологічного процесу  $g = 0,614$  кг/с, витрати повітря  $G = 2,32$  кг/с. Для теплоізоляції печі вибираємо базальтоне волокно, товщиною 0,13м. Димар, приймаемо висотою 35 м та діаметром 5 м.

					ЛН11.065451.001ПЗ	Арк.
						5
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Конспект лекцій з дисципліни «Пічне обладнання у хімічних процесах» для студентів напрямку 6.050503 «Машинобудування» [Електронний ресурс] / НТУУ «КПІ» ; уклад. А. Р. Степанюк. – Електронні текстові дані (1 файл: 2,32 Мбайт). – Київ: НТУУ «КПІ», 2016. – 132 с. – Назва з екрана. – Доступ: <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/15245> Свідоцтво ІХФ № 05/06-1

2. Спеціальні методи термічної підготовки: практикум [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 133 Галузеве машинобудування, освітньої професійна програма бакалаврів «Комп'ютерно-інтегровані технології проектування обладнання хімічної інженерії» / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: Степанюк А.Р. – Електронні текстові дані (1 файл: 5,14 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. – 113 с. Назва з екрана. – Доступ: [https://ci.kpi.ua/METODA/New\\_book/%D0%9F%D0%B5%D1%87%D1%96\\_%D0%B4%D0%BB%D1%8F\\_4\\_%D0%BA%D1%83%D1%80%D1%81%D1%83\\_%D0%BF%D1%80%D0%B0%D0%BA%D1%82%D0%B8%D0%BA%D0%B0\\_2022\\_%D1%80\\_%D0%B2%D0%B0%D1%80\\_20.pdf](https://ci.kpi.ua/METODA/New_book/%D0%9F%D0%B5%D1%87%D1%96_%D0%B4%D0%BB%D1%8F_4_%D0%BA%D1%83%D1%80%D1%81%D1%83_%D0%BF%D1%80%D0%B0%D0%BA%D1%82%D0%B8%D0%BA%D0%B0_2022_%D1%80_%D0%B2%D0%B0%D1%80_20.pdf)

					ЛН11.065451.001ПЗ	Арк. 5
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат		