

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:**  
**“Проектування і розрахунок камерного сушила періодичної дії**  
**ємністю 25 т/год.”**

Виконав здобувач вищої освіти  
IV курсу, групи ПМ-23мб-1  
спеціальності 131  
«Прикладна механіка»  
\_\_\_\_\_ Іван КОНДРАТЮК  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 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  
Кондратюка Івана Сергійовича**

1. Тема роботи: Проектування і розрахунок камерного сушила періодичної дії ємністю 25 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 камерного сушила та розрахувати основні його розміри. Визначити тепловий баланс проектованого 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, теплового балансу проектованого 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

\_\_\_\_\_ Іван КОНДРАТЮК

## АНОТАЦІЯ

Кондратюк І.С. Проектування і розрахунок камерного сушила періодичної дії ємністю 25 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 вивченні конструкції та роботи камерного сушила, а також розрахунок розмірів сушила і розрахунок теплового балансу проєктованого сушила ємністю 20 т/год.

Процес проектування камерного сушила безперервної дії для ливарних форм передбачає виконання таких етапів: визначення геометричних параметрів (розмірів) апарата та складання теплового балансу для забезпечення процесу сушіння.

Графічна частина камерне сушило – загальний вигляд.

**Сушило, камерне, паливо, топка, форми, тепловий баланс**

## ABSTRACT

Kondratyuk I.S. Design and calculation of a chamber dryer of periodic action with a capacity of 25 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 qualification bachelor's work is to study, design and operation of a chamber dryer, as well as calculate the dimensions of the dryer and calculate the heat balance of the designed dryer with a capacity of 20 t/h.

The process of designing a continuous chamber dryer for casting molds involves the following stages: determining the geometric parameters (dimensions) of the apparatus and compiling a heat balance to ensure the drying process.

Graphic part of the chamber dryer - general view.

**Dryer, chamber, fuel, furnace, molds, heat balance**

## З м і с т

Вступ.....	7
РОЗДІЛ 1. Конструкція сушил та їх принцип дії.....	9
РОЗДІЛ 2. Тепловий розрахунок камерного сушила.....	14
2.1. Дані для розрахунку камерного сушила.....	14
2.2. Розрахунок горіння палива.....	14
2.3. Визначення ентальпії продуктів горіння.....	15
2.4. Теоретичний процес сушіння за $H-d$ діаграмою.....	18
2.5. Кількість вологи, яка виділяється із формувальної суміші.....	19
2.6. Втрати теплоти в процесі сушіння.....	19
2.7. Витрати ентальпії газів при сушінні.....	22
2.8. Дійсний процес сушіння за $H-d$ діаграмою.....	23
РОЗДІЛ 3. Визначення витрати палива.....	25
РОЗДІЛ 4. Тепловий баланс камерного сушила.....	26
РОЗДІЛ 5. Розробка конструкції камерного сушила.....	28
Висновки.....	30
Література.....	31
Додатки.....	32
Додаток 1. Загальний вид камерного сушила.....	33

## Вступ

Для видалення вологи з ливарних форм та стержнів використовують камерні сушила, де гаряче повітря забезпечує рівномірне прогрівання. Завдяки такому впливу підвищується якість і міцність форм, а також мінімізується ризик браку при литті. Такі установки відрізняються типом нагріву (електричні, інфрачервоні, газові) та системами керування, що дозволяє гнучко налаштовувати індивідуальні режими сушіння..

Принцип роботи камерних сушил наступний:

- перше це завантаження форм і стержнів, які будуть розміщені на лотках або візках всередині сушильної камери;
- друге нагрівання повітря, використовують нагрівачі (електричні ТЕН, газові пальники, ІЧ-лампи);
- третє циркуляція гарячого повітря відбувається вентиляторами вони забезпечують примусову циркуляцію гарячого повітря, що омиває вироби.
- четверте видалення вологи, волога з форм випаровується і виводиться через систему вентиляції, яка оснащена фільтрами.
- п'яте контроль, автоматичні системи будуть підтримувати задану температуру та вологість.

Типи камерних сушилок:

- це з природною конвекцією, прості, повітря циркулює саме (але вони мало ефективні);
- з примусовою конвекцією ( це конвекційні), найпоширеніші, з вентиляторами для звісно рівномірного сушіння виробів;
- інфрачервоні вони застосовують ІЧ-випромінювання для дійсно швидкого прогрівання, та ефективні також для деяких типів сумішей;
- вакуумні використовують для сушіння відповідно при невеликій температурі, це запобігає окисленню і деформації.

Основні характеристики камерних сушил. Температурний діапазон від 20 °С до 300- 600 °С. Продуктивність буде залежати від об'єму сушильної

камери і швидкості сушіння. Розміри камери застосовують як невеликі лабораторні так і великогабаритно-промислові. Потужність використовується електрична, газова та дизельна.

Переваги камерного сушіння це рівномірне просушування, зменшення браку виробів, можливість точного контролю процесу сушіння, збільшення міцності і якості форм та стержнів.

Застосовується камерне сушіння в ливарному виробництві для сушіння як піщаних форм так і стрижневих ящиків.

Окрім піщано-глинистої основи, до складу формувальних і стержневих сумішей вводять мінеральні та неорганічні добавки. Вони забезпечують високу вогнетривкість, термічну стійкість і стабільність об'єму під час нагрівання, а також дозволяють вільно регулювати режими сушіння.

Використання органічних зв'язуючих речовин, зокрема патоки чи декстринів, впливає на процес сушіння, вимагаючи обмеження швидкості зростання температури та її максимального рівня.

Вибір оптимального режиму сушіння залежить від складу, розмірів та форми матеріалів, які необхідно висушити. При перевищенні оптимальної температури і швидкості сушіння, ливарні форми і стержні будуть втрачати свої властивості – може відбуватися як розкладання, так і випаровування зв'язуючих сполук, отже, втрачається міцність ливарних форм і стержнів, а рідкий метал, безумовно, може зруйнувати форму і стрижень при заливці, якщо температура сушіння буде нижче оптимальної.

З цього випливає, що вибір сполучної речовини визначає стійкість виробу за умов відповідного температурного режиму. Тому, температура сушіння стержнів і форм знаходиться в діапазоні 350...600 °С, для піску при температурі 700...800 °С, для глини при 650...800 °С.

## РОЗДІЛ 1. Конструкція сушил та їх принцип дії [1-6]

**Камерні сушила з викатним візком.** Конструкція цього сушила являє собою камеру (рис. 1.1). Стінки цієї камери викладені з червоної цегли, а зверху вона перекрита кількома подовжніми зводами, що спираються на двотаврові балки. Щоб зменшити втрати теплоти звід відповідно засипають шлаком або піском. Сушильна камера кріпиться за допомогою металевого каркасу зі швелерів. Топки для використання твердого палива розташовуються нижче рівня підлоги виробничого цеху. Щоб їх обслуговувати, облаштовується приямок, ширина якого повинна забезпечувати не тільки зручне обслуговування, але й ремонт топки. Приямок зверху виконують відкритим або можна перекривати залізними решітками. Топки необхідно викладати із шамотної цегли. Камерні сушила опалюють кам'яним вугіллям, антрацитом або генераторним газом, який спалюється в топках з горизонтальними колосниковими решітками.

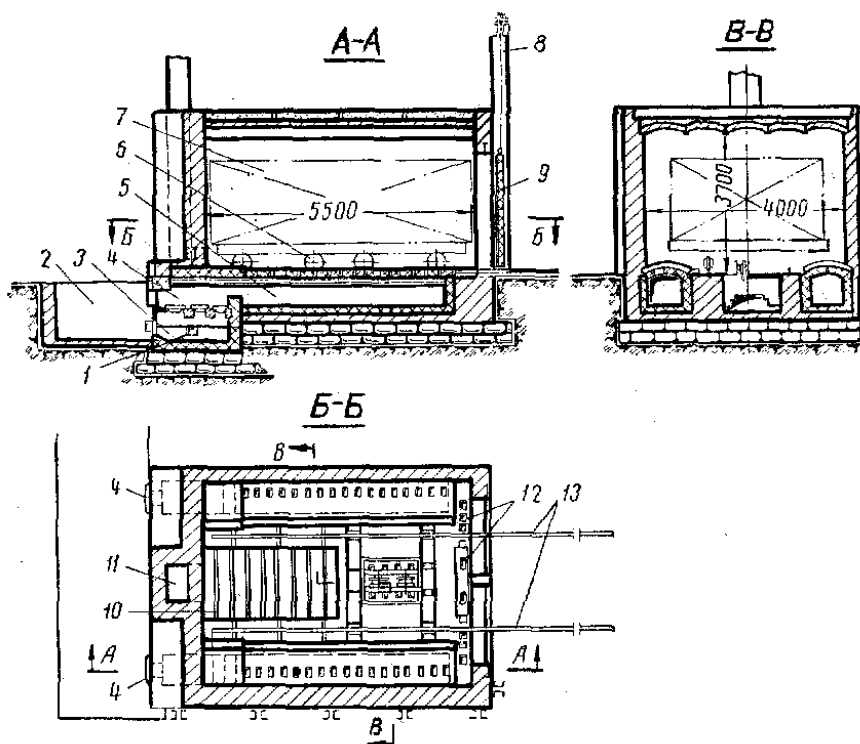


Рис. 1.1 Камерне сушило з викатним візком:

- 1 – канал дугтя під колосники; 2 – приямок топки; 3 – зольник; 4 – топка;
- 5 – димохід; 6 – викатний візок; 7 – максимальний габарит завантаження;
- 8 – піднімання дверцят; 9 – піднімальні двері; 10 – димар; 11 – димова труба; 12 – отвори для відсмоктування газів; 13 – рейки візка

На рис. 1.1 зображено камерне сушило, в якому агенти сушіння рухаються шляхом природної рециркуляції. Продукти згоряння з камерної топки спрямовуються у димові канали, прокладені під подом вздовж поздовжніх стін сушила, після чого через отвори у склепінні каналів потрапляють безпосередньо у сушильну камеру. В поді сушильної камери, по її подовжній осі, розташований центральний димохід, який веде до димаря камери. Топкові гази, при виході з отворів бокових димоходів, під дією геометричного напору будуть підніматися вгору, при цьому захоплюють за собою частину охолоджених газів та знижують свою температуру. Далі гази будуть опускатися вниз завдяки дії димової труби. За таким способом в сушилі буде створюватися внутрішня циркуляція газів, це сприяє усередненню температури та, звісно, хімічного складу димових газів у робочому просторі камерного сушила. Димохід, який розташований в поді сушила, вимагає постійного нагляду, бо він може легко засипатися піском або сміттям, та перекиваючись зводик може обвалюватися, в результаті цього порушується циркуляція газів.

Двері сушила виготовлені з металевого каркасу, який обшитий з двох його боків листовим залізом. Проміжок шириною 80-120 мм між листами буде заповнюватися легкою цеглою або шлаковатою. Двері сушильної камери, як правило, виконуються під'ємними. Піднімання дверей для невеликих сушил виконується вручну, а от для великих – за допомогою електролебідок. Візок буде пересуватися по рейках за допомогою, як ручної так і електричної лебідки. Візок має достатню міцність та твердість і мінімальну висоту над рівнем підлоги відділення сушіння матеріалів та виробів. При високій температурі мастило підшипників вигорає і це затрудняє пересування візка. Найбільш раціональною конструкцією є візки, при яких осі колес будуть вільно переміщатися під платформою між направляючими виступами (рис.1.2). Коли вісь докотиться до заднього за рухом платформи виступу, візок звісно одержить необхідне прискорення, і вже подальше її пересування буде здійснюватися порівняно легко та без

змащення. Використовуються також роликові підшипники з відповідно графітовим змащенням.

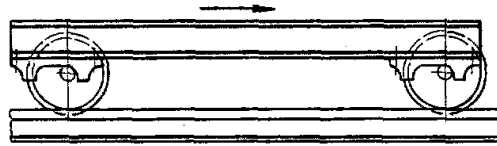


Рис. 1.2 Візок великого сушила

Під час використання сухого формування в ливарному виробництві виготовлення форм та заливка металу виконуються у різних відділеннях цеху.

В цьому випадку застосовуються тунельні (прохідні) камери, конструктивною особливістю яких є наявність дверних отворів з обох боків. Завантаження сировини здійснюється через один торець, а вивантаження готової продукції — через протилежний.

**Камерні сушила з етажерками** використовуються для сушіння дрібних та середніх стержнів. Етажерки будуть переміщатися по рейках на колесах або ще перевозитися електрокарами з піднімальною платформою. Щоб полегшити пересування їх виготовляють невеликими, тому в сушило по довжині може помістатися 2 або 4 етажерки. Конструкція сушила з викатною етажеркою наведено на рис. 1.3.

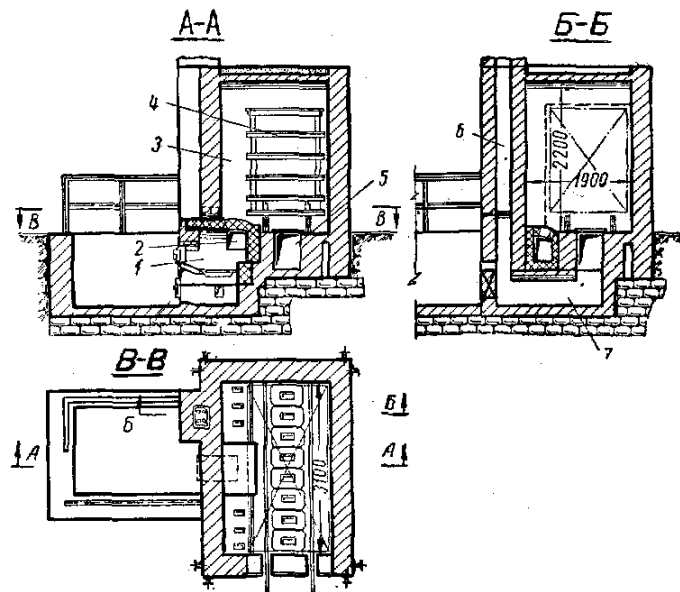


Рис. 1.3 Сушило з викатною етажеркою: 1 – топка; 2 – димохід гарячих газів; 3 – робочий простір сушила; 4 – викатна етажерка; 5 – димохід газів; 6 – димова труба; 7 – димар

**Сушила з висувними полицями** виготовляються таких типів: а) з поворотними полицями; б) з висувними полицями.

Сушило з поворотними полицями наведено на рис. 1.4. Сушильна камера будується з червоної цегли. Грачасті полиці закріплені безпосередньо на дверцятах, тому при їх відкритті конструкція висувається назовні для зручності доступу. До полиці також прикріплена заслінка, вона буде закривати отвір в сушиллі зсередини при її повороті. Кожна полиця може завантажуватися стержнями самостійно, а тому камера може працювати безперервно.

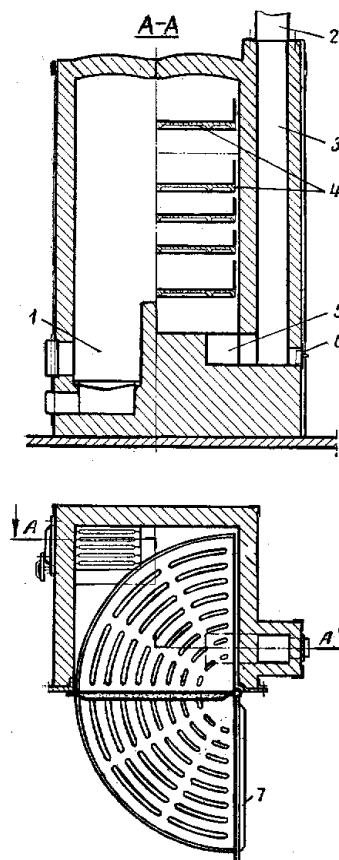


Рис. 1.4. Сушило з поворотними полицями:

- 1 – топка; 2 – димова труба; 3 – вертикальний димохід;
- 4 – поворотні полиці; 5 – нижній димохід; 6 – вікно для очищення димоходу; 7 – дверцята

Конструкція передбачає розміщення топки під камерою, причому паливо може бути будь-яким. Вихід продуктів згоряння реалізовано через нижній отвір з протилежного боку. Дані сушильні установки підходять для

дрібних стержнів і нерідко функціонують на електричному підігріві. Нагрівальні елементи розташовані в нижній частині камери. У дні камери виконуються ряд отворів із заслінками – це для регулювання циркуляції повітря, а вгорі знаходиться витяжна труба. Камеру виготовляють з листової сталі з подвійними стінками, між ними міститься легка цегла та теплоізоляційна засипка.

Невеликі сушила наведеного типу часто ще називають сушильними шафами. Сушила з полицями, які висуваються, є звичайними камерними сушилами, в них полиці пересуваються по рейках, які закріплені на подовжніх стінах камери. Щоб зменшити охолодження камери при завантаженні або розвантаженні стержнів або форм і попередження виходу топкових газів прямо в цех, кожна полиця повинна мати двері як на передньому, так і на задньому торцях. Є конструкції сушил, в яких кожна полиця висувається самостійно, як наведено на рис. 1.5, та з викочуванням усіх полиць одночасно. В останньому випадку етажерка може підвішуватися до монорейки, укріпленої під зводом сушильної камери.

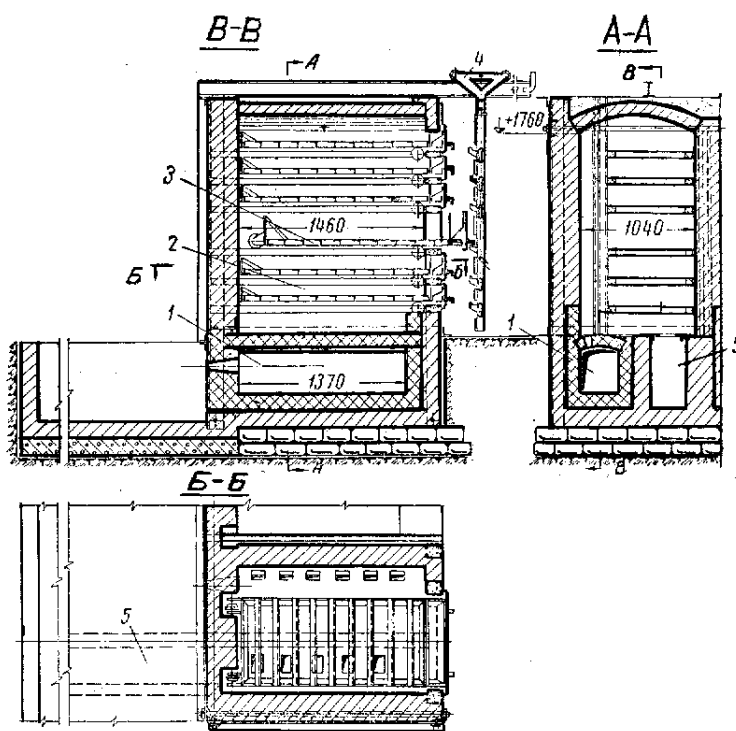


Рис.1.5. Сушило з висувними полицями: 1 – топка; 2 – робочий простір печі; 3 – висувна полиця; 4 – підвісний візок для викочування полиць; 5 – димар

## РОЗДІЛ 2. Тепловий розрахунок камерного сушила [1-6]

Широко застосовують різноманітні методи видалення вологи з матеріалів, серед яких поширеним є камерне сушіння. Цей спосіб передбачає використання нагрітого повітря, суміші димових газів або їхньої комбінації як сушильного агента для випаровування вологи.

Процес сушіння ливарних форм і стержнів зазвичай реалізується за допомогою димових газів. Для прикладу розрахунку візьмемо камерне сушило періодичної дії, зображене на рис. 1.1.

### 2.1. Дані для розрахунку камерного сушила [1-6]

Камерне сушило працює на димових газах, отриманих від спалювання кам'яного вугілля наступного хімічного складу у відсотках за масою:

C <sup>p</sup>	H <sup>p</sup>	O <sup>p</sup>	N <sup>p</sup>	S <sup>p</sup>	W <sup>p</sup>	A <sup>p</sup>	Всього
70,0	4,0	4,3	1,8	0,4	8,5	11,0	100,0

Паливо спалюється в двох топках з горизонтальними колосниковими решітками. Внутрішні розміри камери: довжина 5500 мм, ширина 4000 мм, висота 3700 мм. Місткість камери сушила 25 т вогкої формувальної суміші. Вага металевих опок 15 т. Вага вкатного візка 10 т. Кладка стін сушила виконана з червоної цегли товщиною 510 мм. Звід з цегли товщиною 113 мм і шлакової засипки 200 мм. Під'ємні двері зварної конструкції футеровані легковагою цеглою товщиною 100 мм. Тривалість повного циклу сушіння 7 год. Період роботи топки 5 годин. Максимальна температура нагрівання форм 400 °С. Початкова температура форм 20 °С.

### 2.2. Розрахунок горіння палива [1-6]

Визначаємо теплотворність палива за формулою:

$$Q_{\text{н}}^{\text{p}} = 339 \cdot 70,0 + 1256 \cdot 4,0 + 109(0,4 - 4,3) - 25(9 \cdot 4,0 + 8,5) = 27216 \text{ кДж/кг.}$$

Теоретично необхідну для горіння кількість кисню і теоретичну витрату сухого повітря визначаємо за формулами

$$v_{O_2} = 0,01[1,867 \cdot 70,0 + 0,7(0,4 - 4,3) + 5,6 \cdot 4,0] = 1,50 \text{ нм}^3/\text{кг};$$

$$L_o = (1,0 + 3,762)1,5 = 7,14 \text{ нм}^3/\text{кг}.$$

Вологовміст атмосферного повітря приймаємо  $d_{\text{пов}} = 8,5$  г/кг с.пов. (для літніх умов:  $\varphi = 60\%$  і  $t_b = 22,3^\circ\text{C}$ , що по  $d-h$  діаграмі, відповідає  $d_{\text{пов}} = 8,5$  г/кг с.пов.). Об'єм продуктів горіння при теоретичній витраті повітря знаходимо за формулою. При спалюванні палива водяна пара не вводиться, тому  $W_\phi = 0$ .

$$\text{Величина } 0,1244 g_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{с.п.}} = 0,1244 \cdot 1,293 d_{\text{пов}} = 0,16 d_{\text{пов}}.$$

Тоді

$$V_0^{\text{в.д.}} = 0,01[(1,867 \cdot 70,0 + 0,7 \cdot 0,4) + 11,2 \cdot 4,0 + 1,244 \cdot 8,5 + \\ + 0,16 \cdot 8,5(1 + 3,762)1,50 + 0,8 \cdot 1,8] + 3,762 \cdot 1,50 = 7,62 \text{ нм}^3/\text{кг}$$

### 2.3. Визначення ентальпії продуктів горіння [1-6]

Вважаємо, що димові гази входять з топкової камери в сушило при температурі  $t_{\text{газ}} = 800^\circ\text{C}$ . Це може бути досягнуто розведенням продуктів горіння атмосферним повітрям, яке додатково подається у топку у вигляді вторинного повітря.

Ентальпію димових газів знаходимо за допомогою  $t-h$  діаграми (рис. 2.1). Задавшись попередньо кількістю повітря в димових газах  $V_L = 50\%$ , знайдемо  $h_{\text{газ}} = 1164$  кДж/нм<sup>3</sup>.

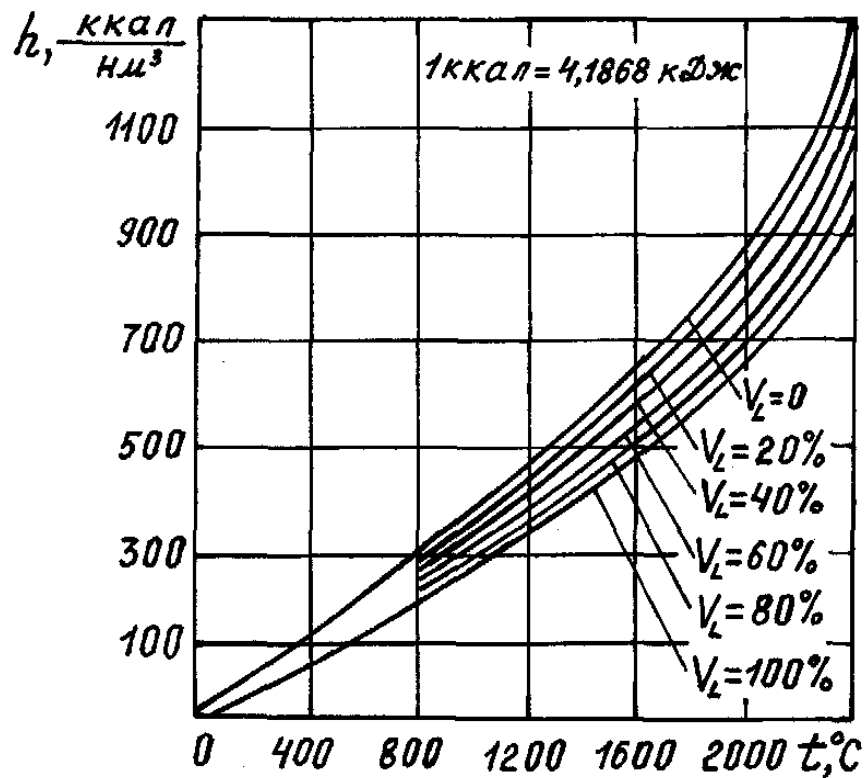


Рис. 2.1 Діаграма  $t-h$  для повітря і продуктів згорання

За допомогою  $d-h$  - діаграми знаходимо для атмосферного повітря  $h_{\text{пов}} = 38$  кДж/кг с.пов. і знаходимо  $v = 0,85$  м<sup>3</sup>/кг с.пов.

Знаходимо загальний коефіцієнт надлишку повітря:

$$1164 = (27216 \cdot 0,9 + \alpha 7,14 \cdot 38/0,85) / [7,62 + (\alpha - 1)7,14] \text{ кДж/м}^3.$$

Звідси  $\alpha = 3,0$ .

Перевіряємо величину  $V_L$ :

$$V_L = (L_\alpha - L_0) / V_\alpha 100;$$

$$L_\alpha = 3,0 \cdot 7,14 = 21,40 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$V_\alpha = 7,62 + (3,0 - 1)7,14 = 21,90 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$V_L = (21,9 - 7,14) / 21,84 \cdot 100 = 71 \text{ \%}.$$

По  $t-h$  - діаграмі (рис. 2.1) для  $V_L = 70 \text{ \%}$  уточнюємо величину  $h_{\text{газ}}$ , яка буде  $h_{\text{газ}} = 1150$  кДж/м<sup>3</sup>. Другий аналогічний розв'язок дає значення  $\alpha = 3,04$ . Такою неточністю можна знехтувати.

Таблиця 2.1

Об'єм вологого повітря на 1 кг сухого повітря ( $v_1$  м<sup>3</sup>/кг)

$t, ^\circ\text{C}$	$\varphi, \%$							
	100	90	80	70	60	50	40	30
-15	0,747	0,747	0,747	0,747	0,747	0,746	0,746	0,746
-10	0,762	0,762	0,762	0,762	0,762	0,761	0,761	0,761
-5	0,778	0,778	0,777	0,777	0,777	0,776	0,776	0,776
0	0,794	0,794	0,793	0,793	0,792	0,792	0,791	0,791
5	0,811	0,810	0,809	0,809	0,808	0,807	0,806	0,806
10	0,828	0,827	0,826	0,825	0,824	0,823	0,822	0,821
15	0,847	0,846	0,844	0,843	0,841	0,840	0,838	0,837
20	0,867	0,865	0,863	0,861	0,859	0,857	0,855	0,853
30	0,915	0,911	0,907	0,903	0,899	0,895	0,891	0,887
40	0,977	0,970	0,962	0,954	0,947	0,940	0,933	0,925
50	1,07	1,05	1,04	1,02	1,01	0,996	0,983	0,970
60	1,20	1,17	1,15	1,12	1,09	1,07	1,05	1,02
70	1,44	1,38	1,32	1,27	1,22	1,17	1,13	1,09
80	1,95	1,79	1,65	1,53	1,43	1,34	1,26	1,19
90	3,57	2,88	2,42	2,08	1,83	1,63	1,47	1,33
100	-	10,9	5,45	3,63	2,72	2,17	1,81	1,55
120	-	11,5	5,73	3,82	2,86	2,28	1,90	1,63
140	-	12,0	6,01	4,01	3,00	2,40	2,00	1,71
160	-	12,6	6,30	4,19	3,14	2,51	2,09	1,79
180	-	13,2	6,58	4,38	3,29	2,63	2,19	1,87
200	-	13,7	6,86	4,57	3,43	2,74	2,28	1,96

При знайденому коефіцієнті надлишку повітря знаходимо кількість сухих продуктів горіння:

$$V_{\text{CO}_2} = 0,0187 \cdot 70,0 = 1,31 \text{ нм}^3/\text{кг};$$

$$V_{\text{N}_2} = 0,79 \cdot 3,04 \cdot 7,14 + 0,008 \cdot 1,8 = 17,15 \text{ нм}^3/\text{кг};$$

$$V_{\text{O}_2} = 0,21(3,04 - 1)7,14 = 3,06 \text{ нм}^3/\text{кг}.$$

Об'ємом  $V_{SO_2}$  нехтуємо через його малу величину.

Знаходимо ентальпію газів за представленою формулою при  $c_{п}t_{п} = V_{SO_2} = 0$ :

$$h_{газ} = (27216 \cdot 0,9 + 3,04 \cdot 7,14 \cdot 38/0,85) / (1,964 \cdot 1,31 + 1,251 \cdot 17,15 + 1,429 \cdot 3,06) = 897 \text{ кДж/кг с. газ.}$$

## 2.4. Теоретичний процес сушіння по $d - h$ - діаграмі [1-6]

За даними  $t_{газ}$  і  $h_{газ}$  знаходимо на  $d - h$  - діаграмі точку  $B'$ , як показано на рис. 2.2. Для того, щоб побудувати теоретичний процес сушіння на  $d - h$  - діаграмі, необхідно на підставі прийнятого режиму сушіння визначити температуру газів при виході їх із сушила як середню за період роботи топки  $t_{відх}$  °С.

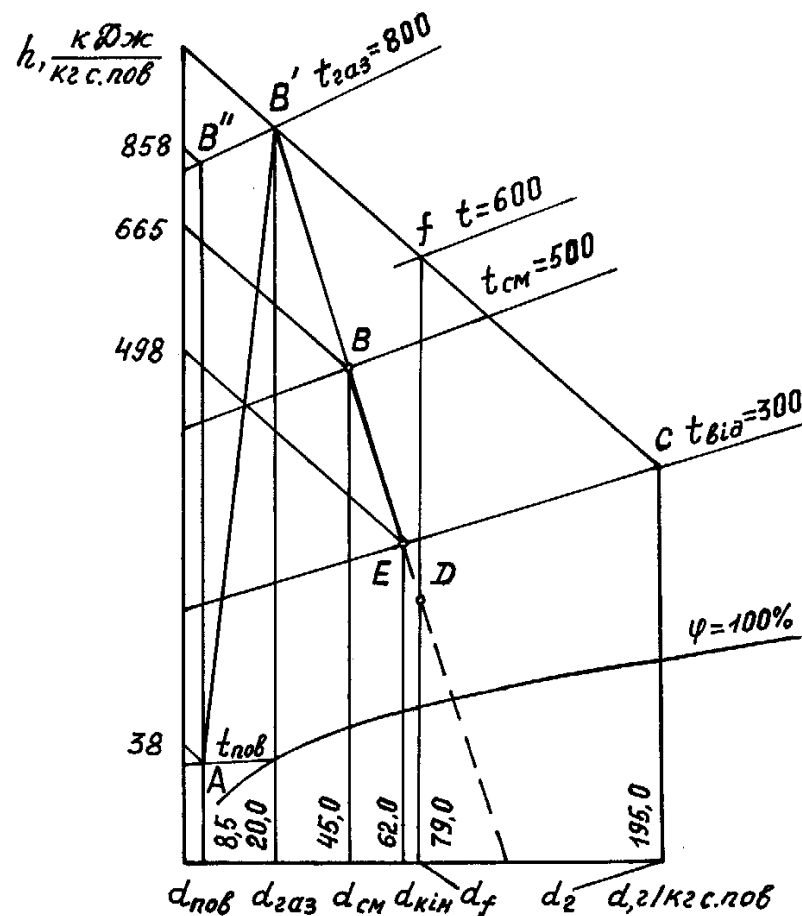


Рис. 2.2. Процес сушіння в камерному сушиллі

На початковій стадії сушильного процесу спостерігається активне випаровування вологи та прогрів камери, через що температура газового середовища суттєво знижується. На завершальній стадії нагріву, після видалення більшої частини вологи, фіксується зростання температури газового середовища в камері. Приймаємо середню температуру відхідних газів  $t_{\text{відх}} = 300^{\circ}\text{C}$ , тоді теоретичний процес сушіння на  $d - h$  – діаграмі буде представлений лінією  $B'C$ . У точці С вологовміст газів буде  $d_2 = 195$  г/кг с.газ.

## 2.5. Кількість вологи, що видаляється з формувальної суміші [1-6]

При розрахунку необхідно врахувати, що форми зазвичай просушуються тільки на необхідну глибину від поверхні. При цьому внутрішні шари формувальної суміші можуть мати вологість, близьку до первісної. Тому приймаємо середню кінцеву вологість формувальної суміші 2 %. Початкова вологість 8 %. Кількість вологи, що видаляється, визначаємо по раніше наведеній формулі:

$$g_{\text{вол}} = G_{\text{вол}}(w_{\text{п}} - w_{\text{к}})/(100 - w_{\text{к}}) = 25000(8,0 - 2,0)/(100 - 2,0) = 1530 \text{ кг/пер,}$$

або  $1530/7 = 219$  кг/год.

## 2.6. Втрати теплоти в процесі сушіння [1-6]

У процесі сушіння теплоенергія витрачається не лише на випаровування вологи, а й на нагрівання матеріалу, вагонеток і конструкцій (опок), а також розсіюється через двері та стіни.

а) Витрата теплоти на нагрівання форм.

За період нагрівання йде поступове підвищення температури форм. Приймаємо в кінці нагрівання середню по масі температуру  $t_{\text{м}} = 300^{\circ}\text{C}$ . Середню теплоємність для піщаноглинистої суміші приймаємо  $c_{\text{м}} = 0,84$  кДж/кг К.

Тоді

$$q_M = (G_{\text{вол}} - g_{\text{вол}})c_M(t_M - t_{\text{п}}) = (25000 - 1530)0,84(300 - 20) = 5,52 \cdot 10^6 \text{ кДж/пер},$$
$$\text{або } 5,52 \cdot 10^6 / 1530 = 3608 \text{ кДж/кг вол.}$$

б) Витрата теплоти на нагрівання металевого візка й опок.

Приймаємо температуру візка й опок  $350^\circ\text{C}$ . Початкова температура  $t_{\text{п}} = 20^\circ\text{C}$ . Теплоємність  $c = 0,57 \text{ кДж/кг град.}$

Тоді

$$q_{\text{тр}} = Gc(t_{\text{к}} - t_{\text{п}}) = (15000 + 10000)0,57(350 - 20) = 4,70 \cdot 10^6 \text{ кДж/пер},$$
$$\text{або } 3074 \text{ кДж/кг вол.}$$

в) Витрата теплоти на нагрівання кладки камери (акумуляція тепла кладкою).

Обсяг тепла, що витрачається на акумуляцію, суттєво зумовлений тим, наскільки прогрілася кладка за час нагрівання, а також рівнем її охолодження протягом попереднього сушильного циклу.

Будемо вважати, що початкова температура стін становить  $t_{\text{поч}} = 50^\circ\text{C}$ . Приймаємо, що за температурним графіком роботи сушила підйом температури внутрішньої поверхні стін від  $t_1 = 50$  до  $t_2 = 400^\circ\text{C}$  йде за 3 години. Тоді середнє значення температури нагрітої поверхні стін за  $\tau = 7$  год. буде:

$$t_{\text{сер}} = [0,5(t_1 + t_2)3 + t_2 \cdot 4] / 7 = [0,5(50 + 400)3 + 400 \cdot 4] / 7 = 325^\circ\text{C}.$$

Визначаємо глибину прогріву стінок камери:

$$x = 0,17 \cdot 10^{-3} t_{\text{сер}} \sqrt{\tau} = 0,17 \cdot 10^{-3} \cdot 325 \sqrt{7} = 0,146 \text{ м.}$$

Отже, стінки камери не прогріті на всю товщину і тепловий потік через стінку в навколишнє середовище дорівнює нулю.

В зв'язку з тим, що ми не знаємо розподіл температур по товщині стінки на початку роботи сушила, наш розрахунок акумуляованої стінкою теплоти є наближеним.

Не вдаючись до громіздкого методу визначення температур по товщині стінки (наприклад, методом скінченних різниць) і спрощуючи розв'язання

задачі, скористаємося емпіричною формулою, справедливою для нескінченно товстих стін або стін кінцевої товщини, що не мають наскрізного прогріву:

$$q'_{ак} = 2,3t_{п} \sqrt{t_{сеп} \tau} = 2,3 \cdot 400 \sqrt{325 \cdot 7} = 43880 \text{ кДж/м}^2.$$

При внутрішній поверхні стін і зводу, рівній

$$F_{ст} = 5,5 \cdot 3,7 \cdot 2 + 4 \cdot 3,7 + 5,5 \cdot 4 = 77,5 \text{ м}^2,$$

теплота, акумульована кладкою:

$$q_{ак} = q'_{ак} F_{ст} = 43880 \cdot 77,5 = 3,4 \cdot 10^6 \text{ кДж/пер або } 2223 \text{ кДж/кг вол.}$$

г) Втрати теплоти теплопровідністю через дверцята і на прогрів дверцят.

Дверцята мають невелику товщину футеровки (100 мм), отже можна вважати, що вона протягом 3 год буде прогріта, після чого через дверцята теплота теплопровідністю передаватиметься в навколишнє середовище.

На прогрівання футеровки дверцят витрачається теплоти при вазі футеровки  $G_{дв} = 1200$  кг, теплоємності пористої цегли  $c = 0,88$  кДж/кг·К і середній по масі температурі прогрітої футеровки  $t_2 = 250$  °С при початковій температурі  $t_1 = 50$  °С:

$$q'_{дв} = G_{дв} c (t_2 - t_1) = 1200 \cdot 0,88 (250 - 50) = 211200 \text{ кДж/пер.}$$

Втрати теплоти в навколишнє середовище через дверцята підраховуємо по формулі:

$$q''_{дв} = [(t_{кл} - t_{пов}) / (s/\lambda + 1/\alpha_{зов})] F \text{ кДж/год.}$$

В нашому випадку маємо:

$$t_{кл} = 400^\circ\text{C}; t_{пов} = 20^\circ\text{C}; S = 0,10 \text{ м}; \lambda = 0,395 \text{ Вт/м}\cdot\text{К};$$

$$\alpha_{зов} = 17,4 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}; F = 15,0 \text{ м}^2.$$

Тоді

$$q''_{дв} = [(400 - 20) / (0,10/0,395 + 1/17,4)] 15 = 18350 \text{ Вт.}$$

За період роботи топки  $\tau = 7$  год. втрати теплопровідністю в навколишнє середовище, враховуючи, що її прогрівання тривало 3 год., дорівнюють:

$$q''_{\text{дв}} = 18350(7 - 3)3600 = 2,6424 \cdot 10^8 \text{ Дж/пер} = 264240 \text{ кДж/пер.}$$

Загальні втрати теплоти через дверцята будуть:

$$q_{\text{дв}} = q'_{\text{дв}} + q''_{\text{дв}} = 211200 + 264240 = 475440 \text{ кДж/пер або } 311 \text{ кДж/кг вол.}$$

Д) Втрати теплоти через вибивання газів, нагрівання підсмоктаного у камеру повітря й інші не враховані втрати в навколишнє середовище приймаємо рівними 5% від суми інших втрат теплоти в сушилi:

$$q_{\text{виб}} = 0,05(q_{\text{м}} + q_{\text{тр}} + q_{\text{ак}} + q_{\text{дв}}) = 0,05(5,52 \cdot 10^6 + 4,70 \cdot 10^6 + 3,40 \cdot 10^6 + 0,48 \cdot 10^6) = \\ = 0,7 \cdot 10^6 \text{ кДж/пер.}$$

Загальні втрати теплоти в сушилi за період роботи топки:

$$q_{\text{втр}} = q_{\text{м}} + q_{\text{тр}} + q_{\text{акк}} + q_{\text{виб}} = 5,52 \cdot 10^6 + 4,70 \cdot 10^6 + 3,40 \cdot 10^6 + 0,48 \cdot 10^6 + 0,7 \cdot 10^6 = \\ = 14,80 \cdot 10^6 \text{ кДж/пер} \\ \text{або } 14,80 \cdot 10^6 / 1530 = 9670 \text{ кДж/кг вол.}$$

## 2.7. Втрати ентальпії газів при сушінні [1-6]

Втрати ентальпії газів при сушінні визначаємо для того, щоб знайти напрямок променя  $B'D$  дійсного процесу сушіння (рис. 2.2). Щоб визначити втрати ентальпії газів, середні за період роботи топки, необхідно спочатку знайти витрату сухих газів при теоретичному процесі сушіння за формулою

$$G_{\text{теор}} = g_{\text{вол}} 1000 / (d_2 - d_{\text{поч}}) \text{ кг с.газ/пер.}$$

З діаграми, відповідно до побудови процесу сушіння, знаходимо:

$$d_2 = 195 \text{ г/кг с. газ;}$$

$$d_{\text{поч}} = 20 \text{ г/кг с. газ (в нашому випадку } d_{\text{поч}} = d_{\text{газ}}).$$

Тоді

$$G_{\text{теор}} = g_{\text{вол}} 1000 / (d_2 - d_{\text{поч}}) = 1530 \cdot 1000 / (195 - 20) = 8740 \text{ кг с.газ/пер.}$$

Втрати ентальпії газів при сушінні для точки  $C$  будуть:

$$h_{\text{втр}} = q_{\text{втр}} / G_{\text{теор}} = 14,80 \cdot 10^6 / 8740 = 1690 \text{ кДж/кг с.г.}$$

По  $d - h$  – діаграмі бачимо, що точка  $D$ , яка визначає напрямок променя  $B'D$  дійсного процесу сушіння, іде далеко за межі діаграми. Тому, щоб наблизити точку  $D$  до точки  $B'$ , вибираємо довільно допоміжну точку  $f$  на перетинанні лінії  $B'C$  з якою-небудь ізотермою, наприклад,  $t = 600^\circ\text{C}$ , як показано на рис. 2.2.

Тоді для точки  $f$  буде  $d_f = 79,0$  г/кг·с.газ.

$$G'_{\text{теор}} = g_{\text{вол}}1000/(d_f - d_{\text{поч}}) = 1530 \cdot 1000/(79 - 20) = 25930 \text{ кг с.газ/пер.}$$

Звідси

$$h'_{\text{втр}} = q_{\text{втр}}/G'_{\text{пот}} = 14,80 \cdot 10^6/25930 = 571 \text{ кДж/кг с.г.}$$

## 2.8. Дійсний процес сушіння за $H-d$ діаграмою [1-6]

Щоб побудувати на  $d - h$  – діаграмі промінь дійсного процесу сушіння, відкладаємо від точки  $f$  униз величину  $h'_{\text{втр}}$ , виражену в тих же одиницях, в яких побудована діаграма (кДж/кг с.газ), і знаходимо точку  $D$ .

Якщо прийняти, що початкова температура газів у сушилі повинна бути на  $100^\circ\text{C}$  вище максимальної температури нагрівання форм, рівної  $400^\circ\text{C}$ , то можна визначити, яка кількість відпрацьованих газів повинна циркулювати в сушилі. В нашому сушилі відбувається циркуляція і змішання топкових газів з газами сушильної камери. Якщо в результаті внутрішньої циркуляції температура газової суміші (як початкова для процесу сушіння) дорівнює  $t_{\text{зм}} = 500^\circ\text{C}$ , то дійсний процес сушіння піде по лінії  $BE$ . Точка  $E$  визначається температурою газів, що відходять, яка прийнята нами  $300^\circ\text{C}$ . Для точки  $E$  вологовміст газів  $d_{\text{кін}} = 62,0$  г/кг с.газ.

Дійсна витрата топкових газів, що виходять з топки з температурою  $t_{\text{газ}} = 800^\circ\text{C}$ , незалежно від кількості циркулюючих у сушилі газів, дорівнює:

$$G_{\text{топ}} = g_{\text{вол}}1000/(d_{\text{кін}} - d_{\text{газ}}) = 1530 \cdot 1000/(62 - 20) = 36430 \text{ кг с.газ/пер.}$$

У середньому за 1 годину роботи топки

$$G_{\text{топ}} = 36430/7 = 5204 \text{ кг с.газ/год,}$$

або на 1 кг вологи, що видаляється з матеріалу,

$$l = 5204/219 = 23,8 \text{ кг с. газ/кг вол.}$$

Така ж кількість сухих газів буде видалятися із сушила, несучи із собою вологу матеріалу, що випарувалася.

Загальна кількість циркулюючих у сушиллі сухих газів за умови, що  $t_{зм} = 500 \text{ }^\circ\text{C}$ , буде:

$$G_{\text{цир}} = 1530 \cdot 1000 / [7(d_{\text{кін}} - d_{\text{см}})] = 1530 \cdot 1000 / [7(62 - 45)] = 12900 \text{ кг с.газ/год.}$$

Кількість газів, що змішуються з топковими для зниження їх температури до  $500 \text{ }^\circ\text{C}$ , легко визначити по різниці  $G_{\text{цир}} - G_{\text{топ}}$ . Таким чином, за допомогою  $d - h$  - діаграми можна просто розрахувати різні варіанти процесу сушіння.

### РОЗДІЛ 3. Визначення витрати палива [1-6]

Витрату теплоти на сушіння розраховуємо за формулою:

$$Q = G_{\text{см}}(h'_{\text{поч}} - h_{\text{пов}}) - g_{\text{вол}} t_{\text{м}} \text{ кДж/год},$$

де  $G_{\text{см}}$  в нашому випадку є  $G_{\text{топ}} = 5204 \text{ кг с. газ/год}$ ;

$h'_{\text{поч}} = 858 \text{ кДж/кг с.газ.}$  (для точки  $B''$  по  $d - h$  - діаграмі).

Тоді

$$Q = 5204(858 - 38) - 917 \cdot 20 = 4,25 \cdot 10^6 \text{ кДж/год}.$$

Витрата палива при його теплотворності  $Q_{\text{н}}^{\text{p}} = 27216 \text{ кДж/кг}$

$$B = Q/Q_{\text{н}}^{\text{p}} = 4,25 \cdot 10^6 / 27216 = 156 \text{ кг/год}.$$

Питома витрата теплоти на сушіння

$$q_w = B Q_{\text{н}}^{\text{p}} / g_{\text{вол}} = 156 \cdot 27216 / 219 = 19390 \text{ кДж/кг вол}.$$

Тепловтрати при сушінні знаходяться в межах допустимого, але їх можна мінімізувати. Для цього пропонується зменшити температуру газів, що виходять, застосувавши примусову циркуляцію в сушильній установці.

Розглянемо за допомогою  $d - h$  - діаграми, наскільки скоротиться витрата теплоти на сушіння, якщо знизити температуру відпрацьованих газів до  $t_{\text{відх}} = 200 \text{ }^\circ\text{C}$ , залишивши незмінними всі теплові втрати.

Побудова процесу сушіння на  $d - h$  - діаграмі така ж, як на рис. 2.2, тільки точка  $E'$  буде лежати на ізотермі  $t = 200 \text{ }^\circ\text{C}$ . При цьому знаходимо  $d'_{\text{кін}} = 71,5 \text{ г/кг с.газ}$ .

Витрата топкових газів:

$$G_{\text{топ}} = g_{\text{вол}} 1000 / [\tau(d'_{\text{кін}} - d_{\text{газ}})] = 1530 \cdot 1000 / [7(71,5 - 20)] = 4244 \text{ кг с.газ/год}.$$

Витрата теплоти:

$$Q = G_{\text{топ}}(h_{\text{поч}} - h_{\text{пов}}) - c_{\text{вол}} g_{\text{вл}} t_{\text{м}} = 4244(858 - 38) - 4,2 \cdot 219 \cdot 20 = 3,46 \cdot 10^6 \text{ кДж/год}.$$

Питома витрата теплоти:

$$q_w = Q/q_{\text{вол}} = 3,46 \cdot 10^6 / 219 = 15810 \text{ кДж/кг вол}.$$

Якщо врахувати, що при зниженні температури відхідних газів і теплові втрати сушила будуть менше, то питома витрата теплоти буде менше, ніж  $15810 \text{ кДж/кг вол}$ .

## РОЗДІЛ 4. Тепловий баланс сушила [1-6]

Тепловий баланс складають у вигляді таблиці, в якій прибуткові і видаткові статті виражають у кДж/год, кДж/пер, кДж/кг матеріалу і кДж/кг вологи. При розрахунку теплових втрат сушила і витрати теплоти на процес сушіння ми визначали питому витрату теплоти, виражену в кДж/кг вологи, що видаляється з матеріалу. Тому без додаткових перерахувань ми можемо прибуток і видаток теплоти на сушіння виразити в кДж/кг вол, що найчастіше застосовується для сушил.

При складанні теплового балансу (табл. 2.2) в прибуток ми включили тільки теплоту, внесену паливом, а у видатку загальну кількість теплоти, винесеної відхідними газами, розділили на дві складові – на теплоту, витрачену на випаровування і нагрівання вологи матеріалу до температури газів, що відходять, і на теплоту відхідних газів за винятком теплоти, винесеної вологою.

Витрату теплоти на випаровування і нагрівання вологи матеріалу до  $t_{\text{відх}} = 300 \text{ }^\circ\text{C}$  визначаємо за формулою:

$$q_{\text{вип}} = 2490 + 1,97 t_{\text{відх}} - 4,2 t_{\text{поч}} = 2490 + 1,97 \cdot 300 - 4,2 \cdot 20 = 2997,0 \text{ кДж/кг вол.},$$

де 2490 – прихована теплота пароутворення в кДж/кгвол;

1,97 – теплоємність водяної пари в інтервалі температур від 0 до 300 °С в кДж/кг·К.

Щоб визначити теплоту, винесену газами, необхідно по  $d - h$  – діаграмі визначити ентальпію, що відповідає точці  $E$  відхідних газів. Це ентальпія  $h_{\text{відх}} = 498$  кДж/кг с.газ. Тоді загальна кількість теплоти, винесеної газами, з урахуванням пари, за винятком початкової ентальпії повітря  $q_{\text{відх}}$ , дорівнює:

$$q'_{\text{відх}} = l(h_{\text{відх}} - h_{\text{пов}}) = 23,8(498 - 38) = 10950 \text{ кДж/кг вол.}$$

## Тепловий баланс камерного сушила

Прибуток	$\frac{\text{кДж}}{\text{кг вол}}$	%	Видаток	$\frac{\text{кДж}}{\text{кг вол}}$	%
1	2	3	4	5	6
1.Теплота, внесена паливом, $q_w = B Q_n^p / l$	19390	100,0	1. Нагрівання формувального го матеріалу $q_m$ .	3608	18,6
			2. Нагрівання опок і візка $q_{тр}$ .	3074	15,8
Всього	19390	100,0	3. Нагрівання кладки і втрати в навколишнє середовище $q_{ак} + q_{дв}$ .	2534	13,1
			4. Нагрівання підсмоктаного повітря і інші невраховані втрати $q_{пов}$ .	458	2,4
			5. Випаровування і нагрівання вологи матеріалу $q_{вип}$ .	2997	15,5
			6. Теплота відхідних газів, за винятком теплоти, винесеної вологою $q_{відх}$ .	6860	35,3
			7. Нев'язка	-141	-0,7
			Всього	19390	100,0

Щоб визначити теплоту  $q_{відх}$ , винесену продуктами горіння, відповідну точці  $B''$  (тобто нижчій теплотворності палива), за винятком теплоти, винесеної вологою, що випарувалася з матеріалу  $q_{вип}$ , необхідно прийняти:

$$q_{відх} = q'_{відх} - (q_{вип} + h_{пар}),$$

де  $h_{пар}$  – різниця ентальпій пари у точках  $B'$  і  $B''$  на діаграмі (рис. 2.2).

$$h_{пар} = l(h_{газ} - h'_{пoch}) = 23,8(904 - 858) = 1095 \text{ кДж/кг вол.}$$

Тоді

$$q_{відх} = q'_{відх} - (q_{вип} + h_{пар}) = 10950 - (2997 + 1095) = 6860 \text{ кДж/кгвол.}$$

## РОЗДІЛ 5. Розробка конструкції камерного сушила [1-6]

Виконано конструювання камерного сушила, яке базується на попередньо проведених розрахунках: визначенні витрат палива/теплоти, а також аналізі теоретичного та дійсного процесів сушіння. Сушило буде являти собою камеру, а стінки його викладаються з цегли, зверху встановлені зводи, які утримуються на двотаврових балках. Щоб не було втрат теплоти, звід треба засипати шлаком, а можливо і піском. Камера кріпиться за допомогою металевого каркасу, виготовленого із швелерів. Топки для спалювання твердого палива треба розташовувати нижче рівня підлоги на виробництві. При обслуговуванні топок необхідний приямок. Топки камерного сушила також викладаються шамотною цеглою. Для опалення камерного сушила використовують тверде паливо – це кам'яне вугілля і антрацит. Спалюють паливо на горизонтальних колосникових решітках, ще застосовують генераторний газ як паливо (рис. 3.1). Сконструйоване камерне сушило відноситься до сушил з природною рециркуляцією газів.

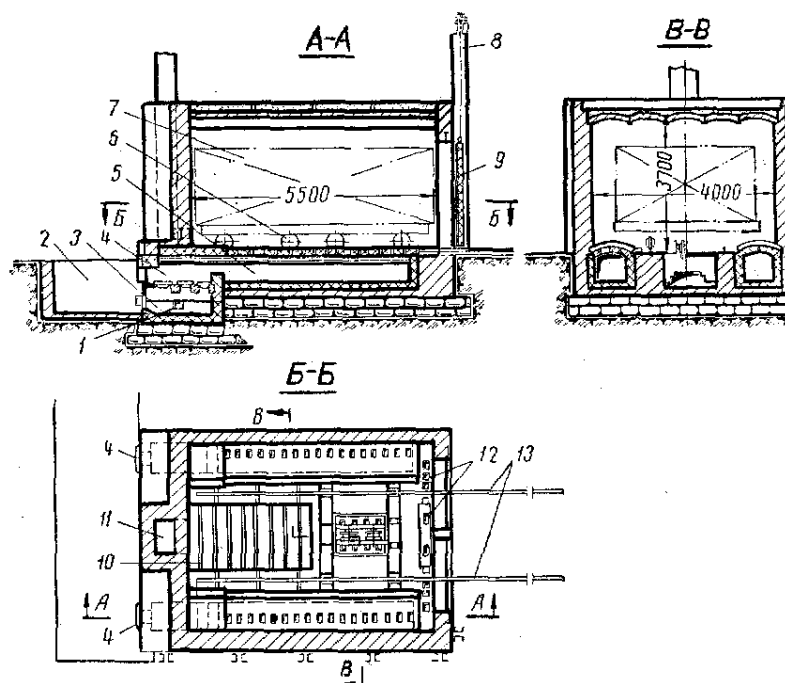


Рис.3.1 Камерне сушило з викатним візком:

- 1 – канал для дуття; 2 – приямок топки; 3 – зольник; 4 – топка;
- 5 – димохід; 6 – викатний візок; 7 – максимальне завантаження;
- 8 – піднімання дверцят; 9 – піднімальні двері; 10 – димар; 11 – димова труба; 12 – отвори для відсмоктування димових газів; 13 – рейки візка

Для облаштування дверей камерного сушила використовують металевий каркас із листовою обшивкою. Щоб забезпечити термоізоляцію, проміжок 80-120 мм між металевими площинами заповнюють утеплювачем або легкою цеглою. Транспортування візка по рейках забезпечується лебідкою. До візка висуваються вимоги щодо високої конструкційної міцності та мінімальної висоти розташування над підлогою.

## **ВИСНОВКИ**

В даній бакалаврській роботі виконано проектування і розрахунок камерного сушила безперервної дії для сушіння форм продуктивністю 25 т/год. Виконано розрахунок процесу горіння палива, визначено тепловий баланс камерного сушила безперервної дії. Розглянуто конструкцію та роботу камерного сушила безперервної дії і визначені його основні розміри.

## 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