

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

А. О. Нагорний

**ТЕПЛОВІ ПРОЦЕСИ В ТЕХНОЛОГІЇ ТУГОПЛАВКИХ
НЕМЕТАЛЕВИХ І СИЛІКАТНИХ МАТЕРІАЛІВ У
ПРИКЛАДАХ І ЗАДАЧАХ**

Навчальний посібник
для студентів спеціальності 161 «Хімічні технології та інженерія»
освітньої програми «Хімічні технології тугоплавких неметалевих і
силікатних матеріалів» усіх форм навчання

Затверджено
редакційно-видавничою
радою університету,
протокол № 2 від 17.05.2019 р.

Харків
НТУ «ХП»
2019

УДК 666.3.041.9 – 691.5 (075,8)
Н 16

Рецензенти:

В. П. Сопов, д-р техн. наук, проф., завідувач кафедри фізико-хімічної механіки та технології будівельних матеріалів і виробів Харківського національного університету будівництва та архітектури;
С. М. Логвінков, д-р техн. наук, проф., професор кафедри природоохоронних технологій, екології та безпеки життєдіяльності Харківського національного економічного університету ім. С. Кузнеця

Нагорний А. О.

Н 16 Теплові процеси в технології тугоплавких неметалевих і силікатних матеріалів у прикладах і задачах: навч. посіб. / Нагорний А. О. – Харків: НТУ «ХПІ», 2019. – 122 с.

ISBN

Розглянуто теоретичні та методологічні засади розрахунків теплових процесів, що мають місце у теплотехнічних агрегатах технології тугоплавких неметалевих і силікатних матеріалів. Наведено приклади розв'язання задач та контрольні задачі для самостійної роботи зі спеціальних дисциплін, що викладаються в рамках освітньої програми «Хімічні технології тугоплавких неметалевих і силікатних матеріалів».

Призначено для студентів вищих навчальних закладів, технікумів та коледжів, а також технологів та інженерно-технічних працівників, що спеціалізуються у галузі хімічних технологій тугоплавких неметалевих і силікатних матеріалів.

Табл. 29. Іл. 12. Бібліогр. 30 назв.

УДК 666.3.041.9 – 691.5 (075,8)

ISBN

© А. О. Нагорний, 2019 р.

ЗМІСТ

Вступ.....	4
Розділ 1. Розрахунки горіння палива.....	6
1.1. Паливо та його характеристики.....	6
1.2. Перерахунки складів палива.....	10
1.3. Розрахунки витрат повітря.....	15
1.4. Розрахунки об'єму і складу продуктів згоряння палива.....	18
1.5. Матеріальний баланс горіння палива.....	20
1.6. Розрахунки калориметричної та дійсної температури горіння палива.....	22
1.7. Розрахунок необхідної температури підігріву повітря.....	26
Задачі для практики.....	37
1.8. Розрахунок тягодуттьових пристроїв, що працюють за рахунок природної тяги. Димарі.....	39
Задачі для практики.....	46
Список літератури до розділу 1.....	49
Розділ 2. Розрахунки теплообміну в робочому просторі печей.....	51
2.1. Розрахунки тепловіддачі газів та кладки на поверхню матеріалу....	51
Задачі для практики.....	56
2.2. Розрахунки прогріву пічних стінок.....	59
2.2.1. Розрахунки теплопровідності та теплопередачі у стаціонарному температурному полі $t = f(x)$	60
Задачі для практики.....	65
2.2.2. Розрахунки теплопровідності та теплопередачі у нестационарному температурному полі $t = f(x, \tau)$	66
Задачі для практики.....	78
2.3. Розрахунок тривалості випалу виробів.....	81
Задачі для практики.....	85
Список літератури до розділу 2.....	87
Розділ 3. Основи розрахунку процесу сушіння.....	89
3.1. Визначення параметрів сушильного агента.....	89
Задачі для практики.....	95
3.2. Визначення витрат тепла та повітря для процесу сушіння.....	97
3.2.1. Процес сушіння підігрітим повітрям.....	98
Задачі для практики.....	105
3.2.2. Процес сушіння сумішшю димових газів з повітрям.....	106
Задачі для практики.....	116
Список літератури до розділу 3.....	121

ВСТУП

Висока енергоємність технологій тугоплавких неметалевих і силікатних матеріалів, скорочено ТТНСМ, обумовлює необхідність вивчення закономірностей взаємозв'язку і взаємообумовленості технологічних та енергетичних, або теплових процесів конкретного виробництва з метою економії паливно-енергетичних ресурсів і створення майже безвідходного виробництва за матеріалами і теплою. За умови правильної розробки енерготехнологічної схеми виробництва значно скорочується споживання первинних енергоресурсів – палива та електроенергії, і підвищується конкурентоспроможність продукції, що випускається за рахунок зниження її собівартості.

Підготовка бакалаврів за спеціальністю «Хімічні технології та інженерія» у межах освітньої програми «Хімічні технології тугоплавких неметалевих і силікатних матеріалів» передбачає вивчення дисципліни «Теплові процеси в технології тугоплавких неметалевих і силікатних матеріалів». Остання є складовою частиною річної циклової підготовки кваліфікованих технологів у галузі ТТНСМ, спроможних проектувати та експлуатувати сучасне виробництво як сукупність технологічних, теплових процесів та відповідного теплотехнічного обладнання.

Загальна особливість раніше виданих навчальних посібників з теплових процесів і агрегатів у ТТНСМ полягає у тому, що перевагу в них надано викладанню методики теплових розрахунків та меншою мірою комплексним числовим прикладам розрахунків окремих теплових процесів і агрегатів. Для студентів, які повинні виконати розрахунок конкретного теплового процесу, або комплексний розрахунок теплового агрегату в межах курсової роботи, користуватись такими посібниками досить важко.

Досвід викладання теоретичного курсу, проведення практичних занять та виконання розрахункових завдань з дисциплін «Теплові процеси у ТТНСМ» та «Теплотехнічне обладнання підприємств» свідчить про те, що на першому етапі навчання тепловим розрахункам найбільш ефективним навчальним посібником є числовий приклад. Усі теоретичні основи розрахунків мають бути відпрацьовані у лекційному курсі. Методичні пояснення повинні бути підпорядковані прикладу та викладені у мінімально

необхідному обсязі для кожного конкретного випадку. Необхідність певних змін при користуванні як аналога числовим прикладом роз'яснюватиметься керівником у процесі практичних занять та консультацій.

Складність проведення розрахунків теплотехнічного обладнання викликана труднощами, пов'язаними з необхідністю урахування впливу різноманітних чинників на їх теплову роботу, таких як теплові процеси спалювання палива, рух газів, теплообмін в робочому просторі теплового агрегату, теплотехнічні особливості виробництва. Тому розрахунок конкретного теплового агрегату (печі або сушарки) являє собою розрахунок окремих теплових процесів, що відбуваються у ньому за відомих або прийнятих параметрів, наближених до дійсних умов роботи.

Цей навчальний посібник є збірником числових прикладів розрахунків теплових процесів, що мають місце у теплових агрегатах ТТНСМ, які можуть бути використані інженерами-технологами у науковій та виробничій діяльності. Він призначений для виконання розрахунків на практичних заняттях та під час виконання розрахункових завдань, а також при виконанні курсових робіт з дисциплін «Хімічна технологія тонкої та технічної кераміки», «Хімічна технологія вогнетривів та теплоізоляційних матеріалів» та ін., дипломних випускних робіт.

При підготовці навчального посібника було вирішено відмовитись від практики використання додатків наприкінці видання. Усі довідкові та допоміжні матеріали наведені безпосередньо у тексті відповідного розділу в необхідному обсязі. На думку автора, це сприятиме більш повному акцентуванню уваги студентів або користувачів на виконанні практичних розрахунків, які є доволі кропіткими, потребують достатньої точності, а інколи перевірки.

Посібник є продовженням роботи викладачів кафедри технології кераміки, вогнетривів, скла та емалей Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» з підготовки навчальних видань українською мовою, що охоплюють основні технологічні розрахунки у виробництві ТНСМ.

Автор хотів би виокремити та високо оцінити навчальний посібник наших колег Е. М. Сардака, В. І. Голеуса та О. В. Зайчука «Теплові процеси і агрегати в технології тугоплавких неметалевих та силікатних матеріалів» з ДВНЗ «Український Державний хіміко-технологічний університет» м. Дніпра. Багато питань висвітлених у ньому, були використані при укладанні цього посібника.

Автор має висловити щире подяку рецензентам – д. т. н., професору В. П. Сопову та д. т. н., професору С. М. Логвінкову за корисні поправки та рекомендації, надані під час підготовки навчального посібника, а також з подякою сприйматиме всі зауваження та пропозиції, що сприятимуть вдосконаленню цього видання у процесі його апробації.

Розділ 1

РОЗРАХУНКИ ГОРІННЯ ПАЛИВА

1.1. Паливо та його характеристики

Виробництво тугоплавких неметалевих і силікатних матеріалів належить до найбільш енергоємних. Перебіг направлених фізико-хімічних перетворень у матеріалі або виробі обумовлений підведенням певної кількості теплоти, яка є необхідною для забезпечення потрібної температури. У більшості теплотехнічних агрегатів теплоту отримують завдяки виділенню хімічної енергії природних видів палива, тобто матеріали та виробу нагріваються за рахунок теплоти спалювання газоподібного, рідинного або твердого палива.

Паливом називають органічні сполуки, здатні за високих температур вступати у реакцію з киснем, що супроводжується інтенсивним виділенням теплоти.

У зв'язку з розробкою великих покладів природного газу виникла можливість використання ефективних, економічно вигідних видів палива: рідинного та газоподібного, природного та скрапленого. Застосування висококалорійних газів і рідинного палива особливо доцільне для досягнення високих температур і автоматизації процесів горіння цих видів палива. Силікатна промисловість використовує також й велику кількість кам'яного вугілля, яке частіше спалюється у вигляді вугільного пилу або після його газифікації у вигляді генераторного газу.

Склад рідинного або твердого палива може характеризуватись робочою (р), сухою (с) та горючою (г) масами. Елементарний склад робочої маси палива у розрахунку на 1 кг рідинного або твердого палива виражається формулою (1.1), мас. %:

$$C^p + H^p + S^p + O^p + N^p + A^p + W^p = 100. \quad (1.1)$$

Робоча маса палива містить горючі елементи: вуглець – C^p , водень – H^p , сірка – S^p . Причому сірка присутня у складі палива у трьох видах: органічна, входить до складу складних органічних сполук палива; колчеданна, подана у вигляді сполук сірки з металами типу колчедану (MeS); сульфатна, єдина з трьох складових, яка при горінні не окислюється і повністю переходить до золи палива.

O^p – кисень є хімічно з'єднаним з часткою водню палива, що сприяє зменшенню кількості кисню повітря, яке витрачається на горіння палива. N^p – азот, як інертний елемент, при горінні палива переходить з

азотом повітря до продуктів згоряння – димових газів. Азот разом з киснем утворюють внутрішній баласт палива.

A^p – зола робочої маси палива – мінеральна домішка, що містить у собі оксиди кремнію, алюмінію, заліза, солі лужноземельних металів, карбонати та сульфати кальцію, магнію та інших елементів. W^p – волога палива, разом з золою утворюють зовнішній баласт палива (негорюча складова), який знижує тепловий ефект процесу горіння та енергетичну цінність палива.

За умови повної відсутності вологи склад рідинного або твердого палива характеризується сухою масою та виражається формулою (1.2), мас. %:

$$C^c + H^c + S^c + O^c + N^c + A^c = 100. \quad (1.2)$$

За умови повної відсутності золи та вологи склад твердого або рідинного палива характеризується горючою масою та виражається формулою (1.3), мас. %:

$$C^r + H^r + S^r + O^r + N^r = 100. \quad (1.3)$$

В умовах сьогодення у виробництві тугоплавких неметалевих і силікатних матеріалів та виробів у великих кількостях використовують природні гази. Природний газ містить в основному метан – CH_4 , деяку кількість важких вуглеводнів з загальною формулою – C_nH_{2n+2} , CO_2 , H_2S , N_2 , водяну пару H_2O та інші газоподібні сполуки, має високу теплотворну здатність. Склад газового палива виражається сухою та робочою масами та задається в об'ємних відсотках.

Склад природних газів різних родовищ наведений у табл. 1.1, склад рідинних палив – у табл. 1.2.

Основною технічною характеристикою палива є теплота згоряння (теплотворність). Теплота згоряння палива – це кількість теплоти, яка виділяється при повному згорянні 1 кг маси твердого або рідинного палива та 1 м³ газового палива. Відомо, що тепловий ефект горіння водню залежить від агрегатного стану продукту його згоряння (H_2O), тому для палив відрізняють вищу – Q_v^p , та нижчу – Q_n^p теплоту згоряння.

Вища теплота згоряння – це кількість теплоти, яка виділяється при повному згорянні палива за умови конденсації водяної пари, що утворилась при згорянні водню (H^p) та випаровуванні вологи (W^p) робочої маси палива.

Нижча теплота згоряння – це кількість теплоти, яка виділяється при повному згорянні палива за умови, що волога, що утворилась при зго-

рянні водню (H^p) та випаровуванні вологи (W^p) робочої маси палива, перебуває у пароподібному стані. Теплота пароутворення, що витрачається при цьому, лишається невикористаною внаслідок відносно високої температури продуктів згоряння. Враховуючи, що теплота випаровування 1 кг вологи складає 2 500 кДж, зв'язок вищої та нижчої теплоти згоряння виражається рівнянням (1.4), кДж/кг або кДж/м³:

$$Q_{\text{н}}^p = Q_{\text{в}}^p - 2500 \cdot w, \quad (1.4)$$

де w – вміст вологи у продуктах згоряння палива, кг/кг або кг/м³:

$$w = \frac{9H^p + W^p}{100},$$

де $9H^p$ – кількість вологи, що утворилась при згорянні водню робочої маси палива за рівнянням горіння.

Тому для твердих та рідинних палив рівняння (1.4) набуває вигляду рівняння (1.5), кДж/кг:

$$Q_{\text{н}}^p = Q_{\text{в}}^p - 25 \cdot (9H^p + W^p). \quad (1.5)$$

У практичних розрахунках нижчу теплоту згоряння твердого та рідинного палива можна визначити за формулою Д. І. Менделєєва (1.6), кДж/кг:

$$Q_{\text{н}}^p = 339 \cdot C^p + 1030 \cdot H^p - 109 \cdot (O^p - S^p) - 25 \cdot W^p. \quad (1.6)$$

Для газового палива нижча теплота згоряння визначається як сума добуток теплових ефектів складових горючих газів на їх кількість за формулою (1.7), кДж/м³:

$$Q_{\text{н}}^p = 127 \cdot CO^p + 108 \cdot H_2^p + 358 \cdot CH_4^p + 234 \cdot H_2S^p + 587 \cdot C_2H_4^p + 638 \cdot C_2H_6^p + 913 \cdot C_3H_8^p + 1187 \cdot C_4H_{10}^p + 1461 \cdot C_5H_{12}^p. \quad (1.7)$$

Для порівняльних розрахунків та визначення питомої витрати палива на різні види теплової обробки матеріалів користуються одиницями умовного палива, теплота згоряння якого дорівнює 29 300 кДж/кг. Переведення любого палива в одиниці умовного палива здійснюється за допомогою теплового еквівалента E_T (перевідний коефіцієнт), величина якого за формулою (1.8) дорівнює:

$$E_T = \frac{Q_H^P}{29300} \quad (1.8)$$

Таблиця 1.1 – Склад деяких природних газів

Найменування газу	Склад сухого газу, %							
	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀	C ₅ H ₁₂	CO ₂	N ₂	H ₂ S
Природні гази:								
Шебелинський (Україна)	93,2	4,4	0,8	0,6	0,3	0,1	0,6	–
Юліївський (Україна)	98,0	0,3	0,1	0,1	–	0,3	1,2	–
Газлинський (Узбекистан)	95,6	2,7	0,3	0,3	–	0,1	1,0	–
Дашавський (Україна)	97,9	0,5	0,2	0,1	–	0,1	1,2	–
Яблунівський (Україна)	94,0	1,2	0,7	0,4	0,2	0,2	3,3	–
Опішнянський (Україна)	85,9	3,1	1,0	0,4	0,1	0,1	9,4	–
Наїпський (Туркменістан)	81,7	5,0	2,0	1,2	0,6	0,4	8,5	0,6
Березівський (Україна)	91,6	1,6	0,8	0,4	0,2	0,6	4,7	0,1
Гази нафтогазоконденсатних родовищ України:								
Долинський	85,0	2,8	–	1,2	–	11,0	–	–
Бориславський	75,0	6,8	6,0	6,0	0,2	2,0	4,0	–
Качанівський	87,1	3,2	1,2	0,3	0,3	1,8	6,1	–

Таблиця 1.2 – Склад рідинних палив

Найменування палива	Вміст компонентів, %					
	C ^Г	H ^Г	S ^Г	O ^Г +N ^Г	A ^P	W ^P
Мазут малосірчистий марки:						
20	87,2	11,7	0,5	0,6	0,1	2,0
40	87,4	11,2	0,5	0,9	0,2	3,0
60	87,6	10,7	0,7	1,0	0,2	3,0
80 і 100	87,6	10,5	0,9	1,0	0,3	4,0
Мазут сірчистий марки:						
10	85,2	11,6	2,5	0,7	0,1	1,0
20	85,0	11,6	2,9	0,5	0,2	2,0
40	85,0	11,4	3,2	0,4	0,3	3,0
Смоли генераторні	72–90	7–11	0,2–1,7	2–10	1,0	5,0

Розрахунки горіння палива виконують з метою:

- перерахунків складів палива;
- визначення витрат повітря;
- визначення складу і об'єму продуктів згоряння палива;
- складання матеріального та теплового балансів горіння палива;
- визначення температури горіння палива;
- визначення необхідної температури підігріву повітря, якщо наданий вид палива не забезпечує потрібний температурний рівень технологічного процесу;
- вибору тягодуттєвих пристроїв.

Розрахунки горіння палива виконують незалежно від кількості палива, що взагалі спалюється, а результати розрахунків відносять до одиниці маси рідинного палива чи одиниці об'єму газового палива за нормальних умов.

1.2. Перерахунки складів палива

Перерахунки складу газового палива з сухої маси на робочу виконують за формулами (1.9) або (1.10) (на прикладі насичених вуглеводнів), об'єм. %:

$$C_m H_n^p = \frac{C_m H_n^c \cdot (100 - H_2O^p)}{100}; \quad (1.9)$$

$$C_m H_n^p = \frac{C_m H_n^c \cdot 100}{(100 + 0,1243 \cdot d_r)}, \quad (1.10)$$

де $C_m H_n^p$, $C_m H_n^c$ – кількість відповідного компонента газового палива у робочій і сухій масі, об'єм. %; H_2O^p – кількість водяної пари у робочій масі газового палива, об'єм. %, яка для перерахунків обирається довільно, проте не повинна перевищувати 2 %; d_r – кількість вологи в одиниці об'єму сухого газового палива (вологеміст), г/м³ сухого газу, яка за відомої температури газу може бути знайдена за довідковими даними. Аналогічним чином мають бути перераховані й неорганічні компоненти (CO₂, H₂S, N₂ та інші) газового палива.

Якщо є відомим d_r , то кількість водяної пари у робочій масі можна визначити за формулою (1.11), об'єм. %:

$$H_2O^p = \frac{100 \cdot d_r}{(804 + d_r)}. \quad (1.11)$$

Наданий і перерахований склад газового, рідинного або твердого палива наводять у вигляді таблиць 1.3 та 1.4. Перерахунки складів твердого або рідинного палива з однієї маси на іншу проводять множенням кількості відповідного компонента у наданій масі палива на коефіцієнти перерахунку згідно з табл. 1.5. Склад розрахованих мас палива вказують з точністю $\pm 0,01$ %.

Таблиця 1.3 – Склад газового палива (вказується родовище)

Найменування компонентів палива	Кількість компонентів, об'єм. %	
	у сухій масі палива	у робочій масі палива
CH ₄		
C ₂ H ₆		
C ₃ H ₈		
C ₄ H ₁₀		
C ₅ H ₁₂		
CO ₂		
N ₂		
H ₂ S		
H ₂ O		
Усього:	100 %	100 %

Таблиця 1.4 – Склад рідинного палива (вказується назва палива)

Найменування компонентів палива	Кількість компонентів, мас. %		
	у горючій масі палива	у сухій масі палива	у робочій масі палива
C			
H			
O			
N			
S			
A			
W			
Усього:	100 %	100 %	100 %

Таблиця 1.5 – Перерахунки складів рідинного або твердого палива

Надана маса палива	Коефіцієнт перерахунку на масу:		
	робочу	суху	горючу
Робоча	1	$\frac{100}{100 - W^p}$	$\frac{100}{100 - (A^p + W^p)}$
Суха	$\frac{100 - W^p}{100}$	1	$\frac{100}{100 - A^c}$
Горюча	$\frac{100 - (A^p + W^p)}{100}$	$\frac{100 - A^c}{100}$	1

Приклади розрахунків

Приклад 1. Розрахувати нижчу теплоту згоряння сірчастого мазуту, який містить 0,4 мас. % золи (A^p) та 2,5 мас. % води (W^p). Склад горючої маси мазуту, мас. %: С – 84,9; Н – 11,3; S – 3,3; О – 0,2; N – 0,3.

Нижча теплота згоряння (теплотворність) мазуту може бути розрахованою за формулою Д. І. Менделєєва (1.6). Проте, оскільки в формулу (1.6) слід підставляти вміст компонентів робочої маси мазуту, необхідно попередньо перерахувати горючу (надану) масу мазуту на робочу. Перерахунок ведеться за допомогою відповідних коефіцієнтів (див. табл. 1.5). Користуючись коефіцієнтом перерахунку з горючої на робочу масу, визначають вміст вуглецю в робочій масі мазуту:

$$C^p = C^r \cdot \frac{100 - (A^p + W^p)}{100} = 84,9 \cdot \frac{100 - (2,5 + 0,4)}{100} = 82,438 \%$$

Аналогічним чином перераховують усі інші компоненти горючої маси мазуту, а результати зводять до табл. 1.6.

Далі за формулою (1.6) розраховують нижчу теплоту згоряння мазуту:

$$Q_H^p = 339 \cdot 82,438 + 1030 \cdot 10,972 - 109 \cdot (0,194 - 3,204) - 25 \cdot 2,5 = 39\,513 \text{ кДж/кг.}$$

Приклад 2. Розрахувати нижчу теплоту згоряння природного газу Яблунівського родовища (Україна), який містить 3 об'єм. % води. Склад сухого газу, об'єм. %: CH_4 – 94; C_2H_6 – 1,2; C_3H_8 – 0,7; C_4H_{10} – 0,4; C_5H_{12} – 0,2; CO_2 – 0,2; N_2 – 3,3.

Таблиця 1.6 – Склад сірчистого мазуту

Найменування компонентів палива	Кількість компонентів, %	
	у горючій масі	у робочій масі
C	84,9	82,438
H	11,3	10,972
S	3,3	3,204
N	0,3	0,291
O	0,2	0,194
A	–	0,4
W	–	2,5
Усього:	100 %	100 %

Нижча теплота згоряння газового палива може бути розрахованою за формулою (1.7). Подібно прикладу 1, у формулу (1.7) слід підставляти вміст компонентів робочої маси (вологого) газу, тому також необхідно перерахувати надану масу (сухий газ) на робочу (вологий газ). Перерахунок проводять за формулою (1.9) відповідно до якої, вміст метану в робочій масі газу становитиме:

$$CH_4^p = 94 \cdot \frac{100 - 3}{100} = 91,18 \%$$

Аналогічним чином перераховують усі інші компоненти сухого газу, а результати зводять до табл. 1.7.

Далі розраховують нижчу теплоту згоряння газу за формулою (1.7), до якої підставляють лише ті компоненти палива, які присутні у складі робочої маси газу. Тому формула (1.7) набуде такого вигляду:

$$\begin{aligned} Q_p &= 358 \cdot CH_4^p + 638 \cdot C_2H_6^p + 913 \cdot C_3H_8^p + 1187 \cdot C_4H_{10}^p + 1461 \cdot C_5H_{12}^p = \\ &= 358 \cdot 91,18 + 638 \cdot 1,164 + 913 \cdot 0,679 + 1187 \cdot 0,388 + 1461 \cdot 0,194 = \\ &= 34\,749 \text{ кДж/м}^3. \end{aligned}$$

Приклад 3. На скільки знизиться теплотворність природного газу Яблунівського родовища, якщо у ньому збільшиться вміст води з 0,5 до 20 г/м³ сухого газу. Склад сухого газу наведено у прикладі 2.

Якщо відома кількість води в одиниці об'єму сухого газу, то перерахунок на робочу масу можна виконати за формулою (1.10), а вміст води в об'ємних відсотках визначити за формулою (1.11). Тобто за $d_r = 0,5 \text{ г/м}^3$ кількість води у робочій масі становитиме:

$$H_2O^p = \frac{100 \cdot 0,5}{804 + 0,5} = 0,062 \%$$

Таблиця 1.7 – Склад природного газу Яблунівського родовища

Найменування компонентів палива	Кількість компонентів, %	
	у сухій масі	у робочій масі
CH ₄	94	91,18
C ₂ H ₆	1,2	1,164
C ₃ H ₈	0,7	0,679
C ₄ H ₁₀	0,4	0,388
C ₅ H ₁₂	0,2	0,194
CO ₂	0,2	0,194
N ₂	3,3	3,201
H ₂ O	–	3
Усього:	100 %	100 %

Аналогічним чином, за $d_r = 20 \text{ г/м}^3$ кількість води у робочій масі становитиме 2,427 %. Перераховані за формулами (1.9) або (1.10) склади вологого газу за різних значень вологовмісту заносять до табл. 1.8.

Для спрощення розрахунків можна не визначати окремо теплотворність газу $Q_{н1}^p$ за $d_r = 0,5 \text{ г/м}^3$ та $Q_{н2}^p$ за $d_r = 20 \text{ г/м}^3$, а потім їх порівнювати.

Величину зниження теплотворності при збільшенні вологовмісту можна розрахувати таким чином:

$$Q_{н1}^p - Q_{н2}^p = 358 \cdot (93,942 - 91,72) + 638 \cdot (1,199 - 1,171) + 913 \cdot (0,7 - 0,683) + 1187 \cdot (0,4 - 0,39) + 1461 \cdot (0,2 - 0,195) = 847,5 \text{ кДж/м}^3.$$

Таблиця 1.8 – Склад природного газу Яблунівського родовища за різних значень d_r

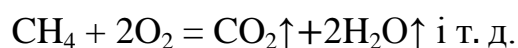
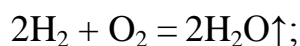
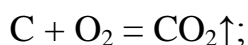
Найменування компонентів палива	Кількість компонентів, %		
	у сухій масі	у робочій масі за $d_r = 0,5 \text{ г/м}^3$	у робочій масі за $d_r = 20 \text{ г/м}^3$
1	2	3	4
CH ₄	94	93,942	91,72
C ₂ H ₆	1,2	1,199	1,171
C ₃ H ₈	0,7	0,7	0,683
C ₄ H ₁₀	0,4	0,4	0,39

Продовження табл. 1.8

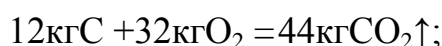
1	2	3	4
C ₅ H ₁₂	0,2	0,2	0,195
CO ₂	0,2	0,2	0,195
N ₂	3,3	3,298	3,22
H ₂ O	–	0,062	2,427
Усього:	100 %	100 %	100 %

1.3. Розрахунки витрат повітря

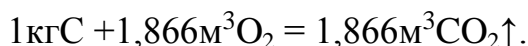
Усі розрахунки горіння палива здійснюють виходячи з рівнянь повного згоряння компонентів палива, на кшталт:



За допомогою цих рівнянь визначають витрати кисню на спалювання горючих компонентів, що містяться в одиниці маси або об'єму палива. Наприклад, користуючись періодичною таблицею елементів, отримують об'єм кисню для спалювання 1 кг вуглецю:



$$1\text{кгC} + \left(\frac{32}{12 \cdot 1,428}\right) \text{м}^3\text{O}_2 = \left(\frac{44}{12 \cdot 1,964}\right) \text{м}^3\text{CO}_2\uparrow;$$



Аналогічно визначають коефіцієнти для спалювання 1 кг H₂ (необхідно 5,56 м³ кисню), для 1 кг сірки – 0,7 м³ кисню, і так далі. Сумуючи витрати кисню на спалювання горючих компонентів, що містяться в 1 кг палива і відіймаючи кисень палива, за формулою (1.12) отримують теоретично необхідний об'єм кисню для спалювання твердого та рідинного палива, м³/кг:

$$V_{O_2} = 0,01 \cdot \left(1,866 \cdot C^p + 5,56 \cdot H^p + 0,7 \cdot S^p - \frac{O^p}{\rho_{O_2}}\right), \quad (1.12)$$

де ρ_{O_2} – густина кисню за нормальних умов, кг/м^3 згідно з табл. 1.9.

Таблиця 1.9 – Густина деяких газів за нормальних умов

Найменування газу	Густина газу, кг/м^3
Водень H_2	0,0899
Оксид вуглецю CO	1,250
Сірководень H_2S	1,520
Метан CH_4	0,716
Етилен C_2H_4	1,252
Етан C_2H_6	1,342
Пропан C_3H_8	1,967
Бутан C_4H_{10}	2,593
Пентан C_5H_{12}	3,219
Гексан C_6H_{14}	3,845
Кисень O_2	1,428
Азот N_2	1,250
Повітря (79 % N_2 +21 % O_2)	1,293
Діоксид вуглецю CO_2	1,964
Водяна пара H_2O	0,804
Сірчаний газ SO_2	2,858

Теоретично необхідний об'єм кисню для спалювання 1 м^3 газового палива за формулою (1.13) становить, $\text{м}^3/\text{м}^3$:

$$V_{O_2} = 0,01 \cdot \left[0,5 \cdot CO^p + 0,5 \cdot H^p + 1,5 \cdot H S^p + \sum \left(m + \frac{n}{4} \right) \frac{C}{m} \frac{H^p}{n} - O^p \right]. \quad (1.13)$$

З урахуванням того, що в атмосферному повітрі (сухому) міститься 21 % кисню за об'ємом, теоретична витрата сухого повітря для горіння за формулою (1.14) становитиме, $\text{м}^3/\text{м}^3$:

$$L_0 = \frac{V_{O_2}}{0,21} = 4,76 \cdot V_{O_2}. \quad (1.14)$$

Тоді теоретична витрата сухого повітря для горіння 1 м³ газового палива за формулою (1.15) становитиме, м³/м³:

$$L_0 = 4,76 \cdot 10^{-2} \cdot [0,5 \cdot C^p + 0,5 \cdot H^p + 1,5 \cdot H_2^p + \sum_{m=1}^n (m + \frac{1}{4}) \cdot C_m^p - O^p] \quad (1.15)$$

Теоретична витрата сухого повітря для горіння 1 кг рідинного або твердого палива за формулою (1.16) становитиме, м³/кг:

$$L_0 = 0,0889 \cdot C^p + 0,265 \cdot H^p - 0,0333 \cdot (O^p - S^p) \quad (1.16)$$

Теоретична витрата вологого повітря для горіння 1 м³ газового палива або 1 кг рідинного та твердого палива за формулою (1.17) становитиме, м³/м³ (м³/кг):

$$L_0^{вол} = (1 + 1,61 \cdot 10^{-3} \cdot d_{пов}) \cdot L_0 \quad (1.17)$$

де $d_{пов}$ – кількість води (вологівміст) в атмосферному повітрі, г/кг сухого повітря; у розрахунках значення $d_{пов}$ обирають у межах 9–11 г/кг сухого повітря.

В умовах експлуатації теплотехнічних агрегатів, якщо подавати для горіння теоретичну кількість повітря, забезпечити повне згоряння палива дуже важко внаслідок нерівномірної подачі повітря та недостатньо інтенсивного змішування повітря з паливом. Тому для горіння подають дійсну кількість повітря – L_α , яке перевищує теоретичну на коефіцієнт витрати (надлишку) повітря – α .

Тоді дійсні витрати сухого (L_α) і вологого ($L_\alpha^{вол}$) повітря для горіння 1 м³ газового палива або 1 кг рідинного та твердого палива за формулами (1.18) та (1.19) становитимуть, м³/м³, (м³/кг):

$$L_\alpha = \alpha \cdot L_0 \quad (1.18)$$

$$L_\alpha^{вол} = \alpha \cdot L_0^{вол} \quad (1.19)$$

Значення коефіцієнта витрати повітря залежать від виду палива, що спалюється, способу спалювання, конструкції паливоспалювальних пристроїв, умов експлуатації печі або сушарки, тощо. З досвіду спалювання газів та мазутів у паливоспалювальних пристроях, при інтенсивному попередньому змішуванні їх з повітрям, значення коефіцієнта витрати повітря може становити 1,05–1,2; в розрахунках зазвичай α обирають у межах 1,2–1,4.

1.4. Розрахунки об'єму і складу продуктів згоряння палива

Газоподібними продуктами згоряння палива є: CO_2 , SO_2 , N_2 , O_2 , H_2O та у деяких випадках CO . Якщо згоряння повне, тобто $\alpha = 1$, то продукти згоряння не містять O_2 , він повністю витрачається на горіння палива і, продуктами повного згоряння палива будуть: CO_2 , SO_2 , N_2 та H_2O . Якщо $\alpha > 1$ (надлишок повітря), то продукти згоряння будуть містити O_2 , він буде не повністю витрачатися на горіння палива і продуктами повного згоряння палива будуть: CO_2 , SO_2 , N_2 , O_2 та H_2O .

Об'єми CO_2 , SO_2 , N_2 , O_2 і H_2O у продуктах згоряння газового палива визначаються за формулами (1.20–1.24), $\text{м}^3/\text{м}^3$:

$$V_{\text{CO}_2} = 0,01 \cdot [\text{CO}^p + \text{CO}_2^p + \sum (m \cdot C_m \text{H}_n^p)]; \quad (1.20)$$

$$V_{\text{SO}_2} = 0,01 \cdot \text{H}_2\text{S}^p; \quad (1.21)$$

$$V_{\text{N}_2} = 0,79 \cdot L_\alpha + 0,01 \cdot \text{N}_2^p; \quad (1.22)$$

$$V_{\text{O}_2} = 0,21 \cdot (\alpha - 1) \cdot L_0; \quad (1.23)$$

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = 0,01 \cdot [\text{H}^p + \text{H}_2\text{S}^p + \sum \left(\frac{n}{2} \cdot C_m \text{H}_n^p \right) + \text{H}_2\text{O}^p + 0,16 \cdot d_{\text{пов}} \cdot L_\alpha]. \quad (1.24)$$

Об'єми CO_2 , SO_2 , N_2 і H_2O у продуктах згоряння рідинного або твердого палива визначаються за формулами (1.25–1.28), об'єм O_2 для всіх видів палива визначається за формулою (1.23), $\text{м}^3/\text{кг}$:

$$V_{\text{CO}_2} = 0,01866 \cdot C^p; \quad (1.25)$$

$$V_{\text{SO}_2} = 0,007 \cdot \text{S}^p; \quad (1.26)$$

$$V_{\text{N}_2} = 0,79 \cdot L_\alpha + 0,008 \cdot \text{N}^p; \quad (1.27)$$

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = 0,0016 \cdot d_{\text{пов}} \cdot L_\alpha + 0,112 \cdot \text{H}^p + 0,0124 \cdot (\text{W}^p + 100 \cdot G_\phi), \quad (1.28)$$

де G_ϕ – витрата водяної пари на розпилювання мазуту, $\text{кг пари}/\text{кг мазуту}$, в розрахунках G_ϕ зазвичай обирають в межах 0,25–0,35 $\text{кг}/\text{кг}$, але якщо розпилювання мазуту відбувається за допомогою повітря, $G_\phi = 0$.

Водяна пара в димових газах утворюється внаслідок згоряння водню у кількості: $9H^p/100 \cdot 0,804 = 0,112 \cdot H^p$; внаслідок випаровування вологи палива: $W^p/100 \cdot 0,804 = 0,0124 \cdot W^p$; крім того, волога надходить з вологим повітрям для горіння у кількості: $(\rho_{\text{пов}} \cdot d_{\text{пов}}/\rho_{\text{H}_2\text{O}} \cdot 1000) \cdot L_{\alpha} = 0,0016 \cdot d_{\text{пов}} \cdot L_{\alpha}$; при використанні форсункового дуття у продуктах згоряння буде присутня волога у кількості: $G_{\phi}/0,804 = 1,24 \cdot G_{\phi}$.

Загальний об'єм продуктів повного згоряння палива визначається за формулою (1.29), $\text{м}^3/\text{м}^3$ або $\text{м}^3/\text{кг}$:

$$V_{\alpha} = V_{\text{CO}_2} + V_{\text{SO}_2} + V_{\text{N}_2} + V_{\text{O}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}}. \quad (1.29)$$

Склад продуктів повного згоряння палива визначається за формулою (1.30), %:

$$x_i = \frac{V_{x_i} \cdot 100}{V_{\alpha}}, \quad (1.30)$$

де x_i – вміст i -го газу в продуктах згоряння (CO_2 , SO_2 , N_2 , O_2 та H_2O), %; V_{x_i} – питомий об'єм, що займає i -й газ у продуктах згоряння (V_{CO_2} , V_{SO_2} , V_{N_2} , V_{O_2} , $V_{\text{H}_2\text{O}}$), $\text{м}^3/\text{м}^3$ або $\text{м}^3/\text{кг}$.

Склад і об'єми продуктів повного згоряння палива вказують у вигляді табл. 1.10.

Таблиця 1.10 – Склад і об'єми продуктів згоряння палива

Найменування компонентів	Кількість компонентів у продуктах згоряння	
	в одиницях об'єму, $\text{м}^3/\text{м}^3$ або $\text{м}^3/\text{кг}$	у відсотках, %
CO_2		
SO_2		
N_2		
O_2		
H_2O		
Усього:	V_{α}	100

Вологовміст продуктів повного згоряння палива визначають за формулою (1.31), г/кг сухих димових газів:

$$d_{\text{д.г}} = \frac{804 \cdot V_{\text{H}_2\text{O}}}{1,964 \cdot V_{\text{CO}_2} + 2,858 \cdot V_{\text{SO}_2} + 1,25 \cdot V_{\text{N}_2} + 1,428 \cdot V_{\text{O}_2}}. \quad (1.31)$$

Вологовміст продуктів повного згорання палива можна також визначити, якщо у формулу (1.31) замість об'ємів продуктів згорання підставити їх відсотковий склад.

Якщо є відомою витрата палива $X_{\text{п}}$ (кг/год або м³/год), то загальна кількість (витрата) димових газів (продуктів згорання) за формулою (1.32) становитиме, м³/год:

$$V_{\text{дг}} = X_{\text{п}} \cdot V_{\alpha} \quad (1.32)$$

Ця кількість димових газів відповідає лише наданому коефіцієнту витрати повітря, з яким відбувається процес горіння.

Рух димових газів робочим простором печі відбувається внаслідок дії розрідження, що його створюють тягодуттьові пристрої. При цьому їх кількість буде збільшуватись завдяки підсмоктуванню атмосферного повітря крізь нещільності у кладці, спостережні отвори, технологічні вікна. Тому розрахунок $V_{\text{дг}}$ за формулою (1.32) має бути скоригований з урахуванням збільшення коефіцієнта витрати повітря.

1.5. Матеріальний баланс горіння палива

Матеріальний баланс являє собою співставлення прибуткової та видаткової складових загальної кількості учасників процесу горіння і може бути записаний у вигляді такого рівняння: $\Sigma_{\text{приб}} = \Sigma_{\text{видат}}$. Прибуткова частина балансу – це сума кількості компонентів палива та повітря, що потрапляють у зону горіння. Видаткова частина балансу – це також сума кількості компонентів продуктів згорання (димових газів), що залишають зону горіння.

Тому в прибутковій частині матеріального балансу мають бути розраховані або наведені (для рідинного або твердого палива) маси всіх компонентів палива, а також основних компонентів повітря: кисню, азоту та водяної пари. Відповідно у видатковій частині мають бути розраховані маси всіх компонентів продуктів згорання.

Для перевірки правильності складання матеріального балансу розраховують розбіжність балансу, яка не повинна перевищувати 0,02 %:

$$\text{Розбіжність: } \frac{|\Sigma_{\text{приб}} - \Sigma_{\text{видат}}|}{\Sigma_{\text{приб}}} \cdot 100 \%$$

Матеріальний баланс горіння палива складають з розрахунків на 100 м³ газового палива або 100 кг рідинного палива у вигляді табл. 1.11.

Таблиця 1.11 – Матеріальний баланс горіння палива

Прибуткові статті	Маса, кг	Витратні статті	Маса, кг
1. З паливом (для газового палива):		З димовими газами:	
$M_{CH_4} = CH_4^p \cdot \rho_{CH_4}$		$M_{CO_2} = V_{CO_2} \cdot 100 \cdot \rho_{CO_2}$	
$M_{C_2H_6} = C_2H_6^p \cdot \rho_{C_2H_6}$		$M_{SO_2} = V_{SO_2} \cdot 100 \cdot \rho_{SO_2}$	
$M_{C_3H_8} = C_3H_8^p \cdot \rho_{C_3H_8}$		$M_{N_2} = V_{N_2} \cdot 100 \cdot \rho_{N_2}$	
$M_{C_4H_{10}} = C_4H_{10}^p \cdot \rho_{C_4H_{10}}$		$M_{O_2} = V_{O_2} \cdot 100 \cdot \rho_{O_2}$	
$M_{C_5H_{12}} = C_5H_{12}^p \cdot \rho_{C_5H_{12}}$		$M_{H_2O} = V_{H_2O} \cdot 100 \cdot \rho_{H_2O}$	
$M_{CO_2} = CO_2^p \cdot \rho_{CO_2}$		Разом ($\Sigma_{\text{видат}}$):	
$M_{N_2} = N_2^p \cdot \rho_{N_2}$			
$M_{H_2S} = H_2S^p \cdot \rho_{H_2S}$			
$M_{H_2O} = H_2O^p \cdot \rho_{H_2O}$			
Всього:			
1. З паливом (для рідинного палива):			
C^p			
H^p			
S^p			
N^p			
O^p			
W^p			
$G_{\phi} \cdot 100$			
Всього:			
2. З повітрям:			
$M_{O_2} = L_{\alpha} \cdot 0,21 \cdot 100 \cdot \rho_{O_2}$			
$M_{N_2} = L_{\alpha} \cdot 0,79 \cdot 100 \cdot \rho_{N_2}$			
$M_{H_2O} = L_{\alpha} \cdot 0,161 \cdot d_{\text{пов}} \cdot \rho_{H_2O}$			
Всього:			
Разом ($\Sigma_{\text{приб}}$):			

Примітка. * – індекс «М» перед формулами газів означає – «маса газу»; густина відповідного газу вказана у табл. 1.9.

1.6. Розрахунки калориметричної та дійсної температури горіння палива

У розрахунках процесу горіння палива відрізняють теоретичну, калориметричну та дійсну температуру горіння. **Теоретична** температура – це температура, яку б могли мати продукти повного згорання палива за умови, що все тепло від горіння буде використано тільки на нагрів продуктів згорання (за відсутності жодних втрат тепла) з урахуванням теплоти дисоціації CO_2 та H_2O , яка суттєво впливає на температуру горіння за її значень вище $1\ 600\ ^\circ\text{C}$. **Калориметрична** температура відрізняється від теоретичної тим, що при її визначенні не враховується теплота дисоціації CO_2 та H_2O . **Дійсна** температура – це температура, яку можуть мати продукти повного згорання палива з урахуванням втрат тепла у зоні горіння внаслідок теплообміну між димовими газами та виробами, матеріалами, а також з навколишнім середовищем.

Теоретична температура горіння може бути визначена з достатньо високою точністю, проте дійсну температуру можна визначити наближено внаслідок того, що важко врахувати конструктивні особливості паливоспалювальних пристроїв та конкретні умови експлуатації печей.

Відповідно до визначення калориметрична температура розраховується виходячи з рівняння теплового балансу горіння палива. Наприклад, тепловий баланс горіння газового палива можна виразити таким рівнянням:

$$Q_{\text{н}}^{\text{р}} + c_{\text{п}} \cdot t_{\text{п}} + c_{\text{пов}} \cdot t_{\text{пов}} \cdot L_{\alpha} = V_{\alpha} \cdot c_{\text{д.г}} \cdot t_{\text{д.г}},$$

де $c_{\text{п}} \cdot t_{\text{п}}$ – фізичне тепло (ентальпія) палива, $\text{кДж}/\text{м}^3$; $c_{\text{пов}} \cdot t_{\text{пов}}$ – фізичне тепло (ентальпія) повітря, $\text{кДж}/\text{м}^3$; $c_{\text{д.г}} \cdot t_{\text{д.г}}$ – загальний тепловміст (ентальпія) продуктів згорання (димових газів), $\text{кДж}/\text{м}^3$; $c_{\text{д.г}}$ – середня теплоємність продуктів згорання, $\text{кДж}/(\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C})$.

Ліва частина рівняння показує прибуток тепла в тепловому балансі або тепло, яке є у розпорядженні. Температура продуктів згорання $t_{\text{д.г}}$ у правій частині рівняння є шуканою калориметричною температурою горіння, яку можна визначити за формулою (1.33), $^\circ\text{C}$:

$$t_{\text{д.г}} = \frac{Q_{\text{н}}^{\text{р}} + c_{\text{п}} \cdot t_{\text{п}} + c_{\text{пов}} \cdot t_{\text{пов}} \cdot L_{\alpha}}{V_{\alpha} \cdot c_{\text{д.г}}}. \quad (1.33)$$

Дійсну температуру горіння визначають враховуючи всі втрати тепла за формулою (1.34), $^\circ\text{C}$:

$$t_d = \frac{(Q_p^p + c_p \cdot t_p + c_{пов} \cdot t_{пов} \cdot L) \cdot \eta_p}{V_\alpha \cdot c_{д.г}}, \quad (1.34)$$

де η_p – пірометричний коефіцієнт процесу горіння, який враховує втрати тепла у зоні горіння внаслідок теплообміну між димовими газами та виробами, матеріалами, а також з навколишнім середовищем. Значення коефіцієнта η_p залежать від виду палива, що спалюється, способу спалювання, конструкції печей та їх паливоспалювальних пристроїв. Для розрахунків значення η_p вибирають у межах 0,73–0,85.

Аналітичний розрахунок теоретичної температури горіння є досить складною задачею, оскільки коефіцієнти дисоціації CO_2 та H_2O , об'єм продуктів згоряння з урахуванням дисоціації та теплота дисоціації залежать від температури горіння, а вона є шуканою величиною. Тому для спрощення задачі визначення теоретичної та калориметричної температури горіння користуються $I-t$ діаграмами, що їх наведено на рис. 1.1 та 1.2. Пунктирні лінії на діаграмі (див. рис. 1.1) відповідають калориметричній температурі димових газів (без урахування дисоціації), суцільні – теоретичній температурі з урахуванням дисоціації за різних значень коефіцієнта витрати повітря: 1,0; 1,2; 1,5; 2,0 та 3,0.

Враховуючи майже лінійну залежність температури димових газів від їх ентальпії, для більш точного визначення калориметричної температури користуються таким аналітичним методом.

Спочатку за формулою (1.35) розраховують ентальпію газової суміші продуктів згоряння палива за калориметричної температури, кДж/м^3 :

$$I_\Gamma = \frac{Q_p^p + c_p \cdot t_p + c_{пов} \cdot t_{пов} \cdot L}{V_\alpha}, \quad (1.35)$$

де c_p , $c_{пов}$ – відповідно теплоємності палива і повітря, які для природного газу можуть бути обираними у межах 1,55–1,67 $\text{кДж}/(\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C})$, для мазуту 1,88–2,05 $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$; t_p – температура палива, для природного газу зазвичай складає 15–20 $^\circ\text{C}$, мазут підігрівають до температури 80–100 $^\circ\text{C}$; $t_{пов}$ – температура повітря, що надходить на горіння, приймається з урахуванням умов утворення газоповітряної суміші і якщо відбувається підігрів повітря у регенераторі, $t_{пов} = 800\text{--}1\,000$ $^\circ\text{C}$.

Далі за $I-t$ діаграмою (див. рис. 1.1) визначають орієнтовне значення калориметричної температури горіння палива $t_{к.ор}$. Для більш точного визначення калориметричної температури треба задатись двома температурами t_1 та t_2 , які б задовольняли нерівності ($t_1 < t_{к.ор} < t_2$).

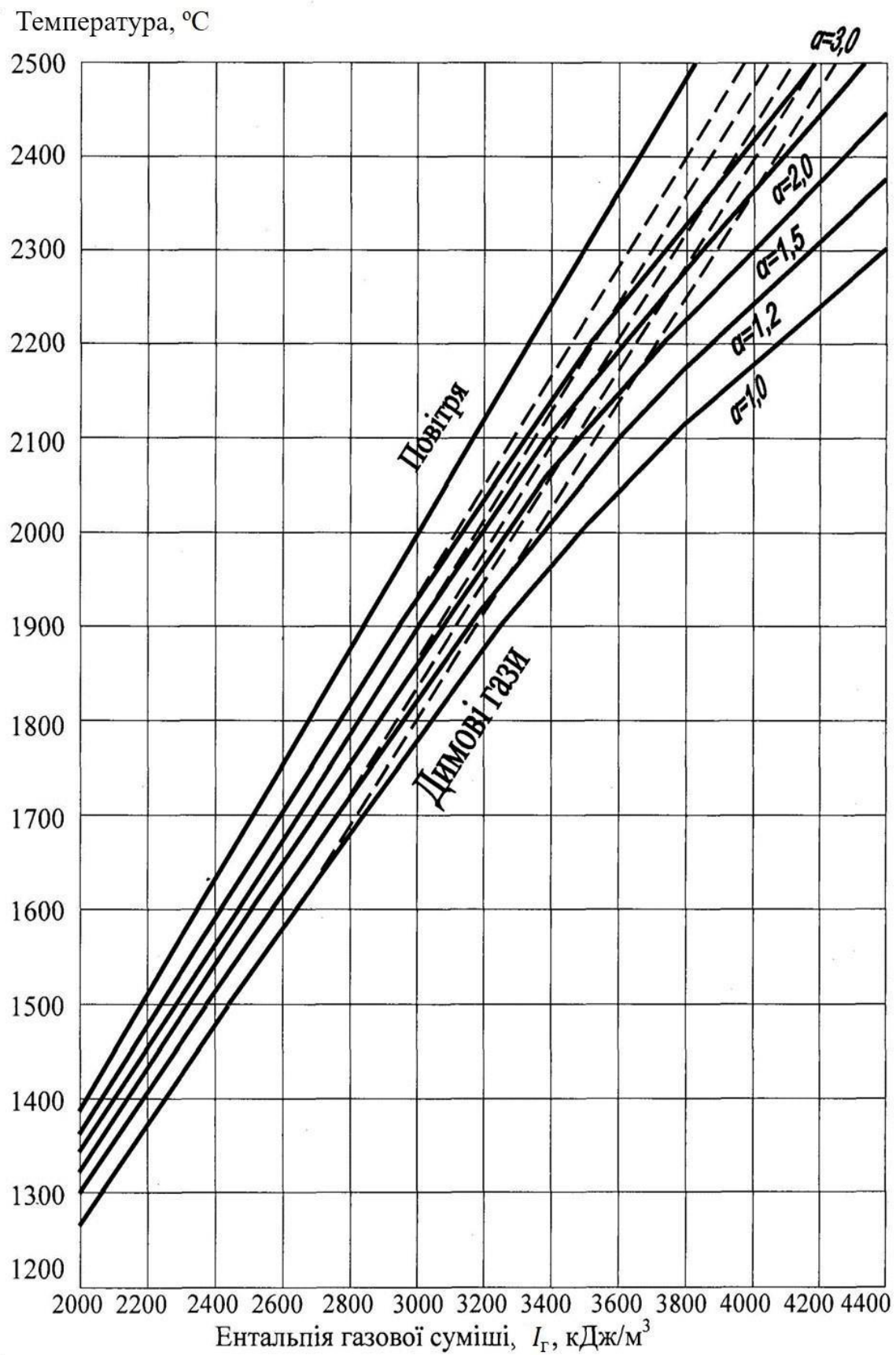


Рис. 1.1. $I - t$ діаграма для високих температур

Температура, °C

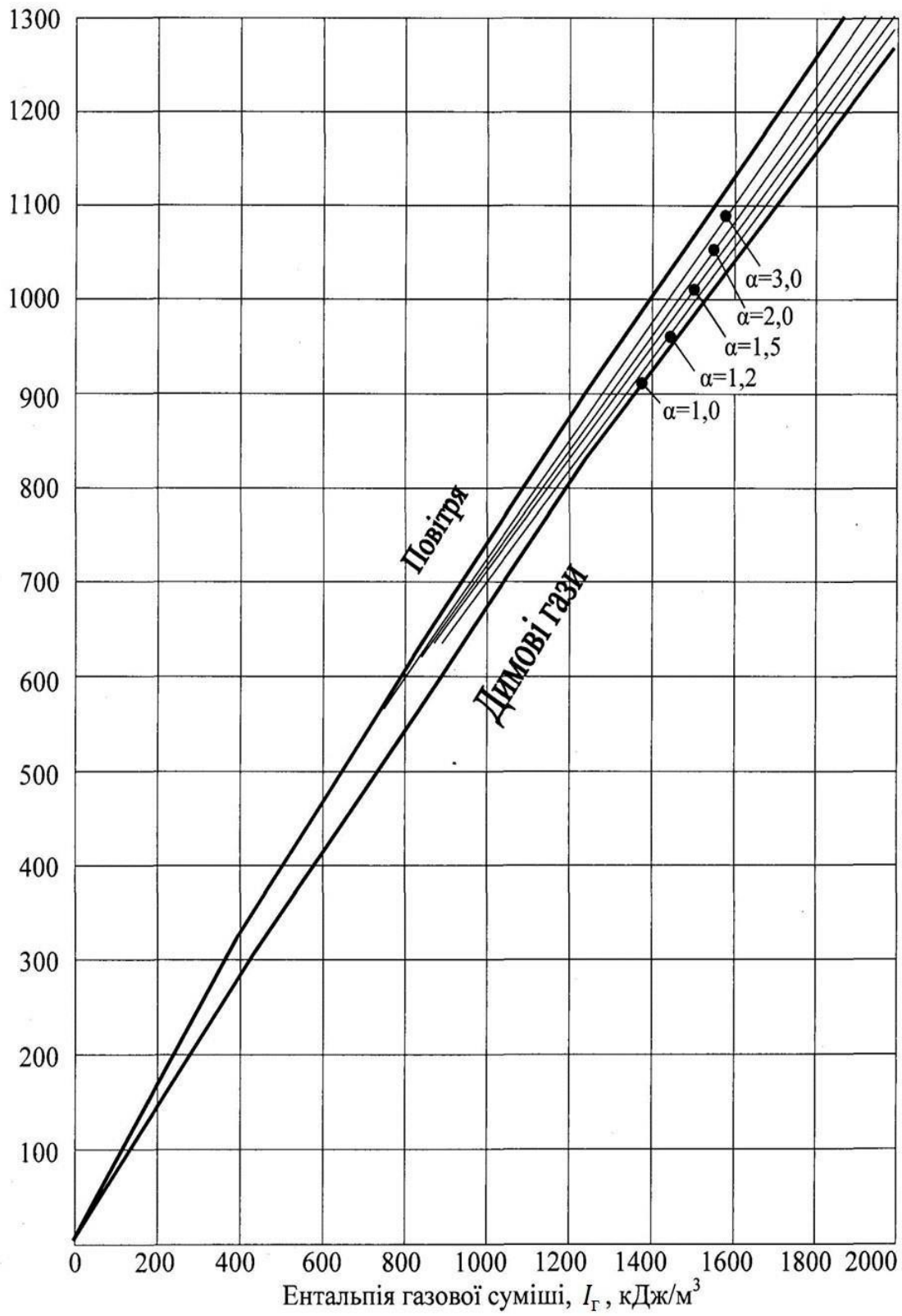


Рис. 1.2. $I-t$ діаграма для низьких температур

Для цих температур необхідно визначити ентальпії продуктів згоряння за формулами (1.36) та (1.37), кДж/м³:

$$I_{r1} = 0,01 \cdot t_1 \cdot \sum(c_{i1} \cdot x_i); \quad (1.36)$$

$$I_{r2} = 0,01 \cdot t_2 \cdot \sum(c_{i2} \cdot x_i); \quad (1.37)$$

де c_{i1} , c_{i2} – відповідно теплоємності газових компонентів (CO₂, SO₂, N₂, O₂, H₂O) у продуктах згоряння палива за температур t_1 і t_2 , кДж/(м³·°C) (див. табл. 1.17); x_i – відсотковий склад газових компонентів у продуктах згоряння палива, % (див. табл. 1.10).

Тоді калориметричну температуру горіння палива можна розрахувати за формулою (1.38), °C:

$$t_k = t_1 + \frac{(I_r - I_{r1}) \cdot (t_2 - t_1)}{(I_{r2} - I_{r1})}. \quad (1.38)$$

Дійсну температуру горіння палива розраховують за формулою (1.39), °C:

$$t_d = t_1 + \frac{(I_r \cdot \eta_{\text{п}} - I_{r1}) \cdot (t_2 - t_1)}{(I_{r2} - I_{r1})}. \quad (1.39)$$

1.7. Розрахунок необхідної температури підігріву повітря

У ряді випадків обраний вид палива не здатний забезпечити потрібної температури у печі, але замінити його на інший в умовах виробництва неможливо. У таких випадках застосовують технічний метод підвищення кількості тепла, що є у розпорядженні шляхом підігріву повітря або палива, яке подають на горіння. Більш простим є метод розрахунку необхідної температури підігріву повітря.

Наприклад, якщо відомо на скільки відсотків слід підвищити кількість тепла, яке є у розпорядженні (I_r) обраного виду палива, необхідну температуру підігріву повітря розраховують таким чином. Тепло, яке є у розпорядженні підігрітого повітря, можна виразити рівнянням (1.40), кДж/м³:

$$I_{\text{розп}}^{\text{необ}} = \frac{c_{\text{пов}}^{\text{необ}} \cdot t_{\text{пов}}^{\text{необ}} \cdot L_{\alpha}}{V_{\alpha}} = I_{\text{пов}}^{\text{необ}} \cdot \frac{L_{\alpha}}{V_{\alpha}}. \quad (1.40)$$

де $I_{\text{розп}}^{\text{необ}}$ – тепло, яке є у розпорядженні підігрітого повітря, необхідне для підвищення I_{Γ} обраного виду палива, кДж/м³; $c_{\text{пов}}^{\text{необ}}$, $t_{\text{пов}}^{\text{необ}}$ – відповідно теплоємність, кДж/(м³·°C) та температура, °C підігрітого повітря.

Додаткову кількість тепла (ентальпію), яке підігріте повітря буде вносити в зону горіння, можна розрахувати за формулою (1.41), кДж/м³:

$$I_{\text{дод}} = I_{\Gamma} \cdot x + I_{\text{дод}}^{\text{пов}} = I_{\Gamma} \cdot x + \frac{c_{\text{пов}} \cdot t_{\text{пов}} \cdot L_{\alpha}}{V_{\alpha}}, \quad (1.41)$$

де x – частка підвищення тепла, яке є у розпорядженні відповідно до необхідного відсотка підвищення I_{Γ} .

Тепловий баланс процесу підігріву повітря можна виразити рівнянням (1.42):

$$I_{\text{дод}} = I_{\text{пов}}^{\text{необ}} \cdot \frac{L_{\alpha}}{V_{\alpha}}. \quad (1.42)$$

Звідки шукану необхідну ентальпію підігрітого повітря розраховують за формулою (1.43), кДж/м³:

$$I_{\text{пов}}^{\text{необ}} = I_{\text{дод}} \cdot \frac{V_{\alpha}}{L_{\alpha}}. \quad (1.43)$$

Користуючись методом розрахунку калориметричної температури горіння, за $I - t$ діаграмою для низьких температур (див. рис. 1.2) визначають орієнтовне значення температури підігріву повітря $t_{\text{пов.ор}}$. Для більш точного визначення температури підігріву повітря задаються двома температурами t_1 та t_2 , які б задовольняли нерівності ($t_1 < t_{\text{пов.ор}} < t_2$). Для цих температур за формулою (1.36) необхідно визначити ентальпії повітря, кДж/м³:

$$I_{\text{пов1}} = c_1 \cdot t_1;$$

$$I_{\text{пов2}} = c_2 \cdot t_2,$$

де c_1 , c_2 – відповідно теплоємності повітря за температур t_1 і t_2 , кДж/(м³·°C) (див. табл. 1.12).

Тоді необхідну температуру підігріву повітря можна розрахувати за формулою (1.38), °C:

$$t_{\text{пов}} = t_1 + \frac{(I_{\text{пов}}^{\text{необ}} - I_{\text{пов1}}) \cdot (t_2 - t_1)}{(I_{\text{пов2}} - I_{\text{пов1}})}$$

Таблиця 1.12 – Середні теплоємності деяких газів, кДж/(м³·°С)

Температура, °С	CO ₂	SO ₂	H ₂ S	H ₂ O	CO	N ₂	O ₂	Сухе повітря
0	1,5998	1,7334	1,5073	1,4943	1,2992	1,2946	1,3059	1,2971
100	1,7003	1,8130	1,5324	1,5052	1,3017	1,2959	1,3176	1,3005
200	1,7874	1,8883	1,5617	1,5224	1,3072	1,2996	1,3352	1,3076
300	1,8628	1,9553	1,5952	1,5425	1,3168	1,3068	1,3562	1,3177
400	1,9298	2,0181	1,6329	1,5655	1,3289	1,3164	1,3775	1,3294
500	2,9888	2,0684	1,6706	1,5898	1,3428	1,3277	1,3980	1,3428
600	2,0412	2,1144	1,7083	1,6149	1,3574	1,3402	1,4168	1,3570
700	2,0885	2,1521	1,7460	1,6413	1,3721	1,3537	1,4345	1,3712
800	2,1312	2,1814	1,7837	1,6681	1,3863	1,3670	1,4500	1,3846
900	2,1693	2,2149	1,8172	1,6957	1,3997	1,3796	1,4646	1,3976
1000	2,2036	2,2359	1,8507	1,7230	1,4127	1,3918	1,4776	1,4098
1100	2,2350	2,2610	1,8842	1,7502	1,4248	1,4035	1,4893	1,4219
1200	2,2639	2,2777	1,9093	1,7770	1,4361	1,4144	1,5006	1,4328
1300	2,2899	2,285	–	1,8029	1,4466	1,4253	1,5107	1,4437
1400	2,3137	2,315	–	1,8280	1,4567	1,4349	1,5203	1,4537
1500	2,3355	2,330	–	1,8527	1,4659	1,4441	1,5295	1,4629
1600	2,3556	2,342	–	1,8762	1,4747	1,4529	1,5379	1,4717
1700	2,3745	2,350	–	1,8996	1,4826	1,4613	1,5463	1,4797
1800	2,3916	2,358	–	1,9214	1,4901	1,4688	1,5542	1,4872
1900	2,4075	2,363	–	1,9424	1,4973	1,4759	1,5618	1,4948
2000	2,4222	2,370	–	1,9629	1,5040	1,4826	1,5693	1,5015
2100	2,4360	2,376	–	1,9825	1,5102	1,4893	1,5760	1,5082
2200	2,4486	2,381	–	2,0010	1,5161	1,4952	1,5831	1,5140
2300	2,4603	–	–	2,0190	1,5216	1,5010	1,5898	1,5203

Отриману температуру підставляють у формулу (1.35), за якою розраховують нову ентальпію газової суміші продуктів згоряння – кількість тепла, яке є у розпорядженні обраного виду палива, що буде більшою на потрібний відсоток.

Після чого у тій послідовності, що викладена у пункті 1.6, розраховують нове значення калориметричної та дійсної температур горіння обраного виду палива.

Приклади розрахунків

Приклад 1. Розрахувати процес горіння (скласти матеріальний баланс, визначити калориметричну та дійсну температури горіння) природного газу. Склад сухого газу, об'єм. %: CH_4 – 78,5; C_2H_6 – 3,6; C_3H_8 – 2,5; C_4H_{10} – 1,5; C_5H_{12} – 1,2; CO_2 – 5,4; N_2 – 3,7; H_2S – 3,6.

Розв'язання задачі починають з перерахунку сухого газу на вологий (з сухої маси на робочу), для чого беруть вміст води у робочій масі – $\text{H}_2\text{O}^p = 1,5$ %. Перерахунок проводять за формулою (1.9), відповідно до якої вміст метану в робочій масі газу становитиме:

$$\text{CH}_4^p = 78,5 \cdot \frac{100 - 1,5}{100} = 77,32 \%$$

Аналогічним чином перераховують усі інші компоненти сухого газу, а результати зводять до табл. 1.13.

Таблиця 1.13 – Склад природного газу

Найменування компонентів палива	Кількість компонентів, %	
	у сухій масі палива	у робочій масі палива
CH_4	78,5	77,323
C_2H_6	3,6	3,546
C_3H_8	2,5	2,463
C_4H_{10}	1,5	1,477
C_5H_{12}	1,2	1,182
CO_2	5,4	5,319
N_2	3,7	3,645
H_2S	3,6	3,546
H_2O	–	1,5
Усього:	100	100

Далі за формулою (1.15) розраховують теоретичну витрату сухого повітря (L_0) для горіння 1 м³ газового палива (м³ повітря/м³ газу), підставляючи до рівняння вміст тільки тих компонентів, які присутні у робочій масі:

$$L_0 = 4,76 \cdot 10^{-2} \cdot [1,5 \cdot 3,546 + 2 \cdot 77,323 + 3,5 \cdot 3,546 + 5 \cdot 2,462 + 6,5 \cdot 1,477 + 8 \cdot 1,182] = 9,698 \text{ м}^3/\text{м}^3$$

Теоретична витрата вологого повітря ($L_0^{\text{вол}}$) для горіння 1 м^3 газового палива (м^3 повітря/ м^3 газу) розраховується за формулою (1.17); $d_{\text{пов}}$ обирають 10 г/кг сухого повітря:

$$L_0^{\text{вол}} = (1 + 1,61 \cdot 10^{-3} \cdot 10) \cdot 9,698 = 9,854 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

Дійсні витрати сухого (L_α) і вологого ($L_\alpha^{\text{вол}}$) повітря для горіння 1 м^3 газового палива розраховують за формулами (1.18) та (1.19). Коефіцієнт витрати повітря (α) обирають $1,2$.

$$L_\alpha = 1,2 \cdot 9,698 = 11,638 \text{ м}^3/\text{м}^3;$$

$$L_\alpha^{\text{вол}} = 1,2 \cdot 9,854 = 11,825 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

Об'єми CO_2 , SO_2 , N_2 , O_2 і H_2O у продуктах згоряння газового палива розраховують за формулами (1.20)–(1.24), м^3 продукту згоряння/ м^3 газу:

$$V_{\text{CO}_2} = 0,01 \cdot [5,319 + 77,323 + 2 \cdot 3,546 + 3 \cdot 2,463 + 4 \cdot 1,477 + 5 \cdot 1,182] = 1,09 \text{ м}^3/\text{м}^3;$$

$$V_{\text{SO}_2} = 0,01 \cdot 3,546 = 0,035 \text{ м}^3/\text{м}^3;$$

$$V_{\text{N}_2} = 0,79 \cdot 11,638 + 0,01 \cdot 3,645 = 9,23 \text{ м}^3/\text{м}^3;$$

$$V_{\text{O}_2} = 0,21 \cdot (1,2 - 1) \cdot 9,698 = 0,407 \text{ м}^3/\text{м}^3;$$

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = 0,01 \cdot [3,546 + 2 \cdot 77,323 + 3 \cdot 3,546 + 4 \cdot 2,462 + 5 \cdot 1,477 + 6 \cdot 1,182 + 1,5 + 0,16 \cdot 10 \cdot 11,638] = 2,133 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

Загальний об'єм продуктів повного згоряння палива визначають за формулою (1.29):

$$V_\alpha = 1,09 + 0,035 + 9,23 + 0,407 + 2,133 = 12,895 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

Склад продуктів повного згоряння палива визначають за формулою (1.30), відповідно до якої вміст CO_2 у продуктах згоряння газу становить:

$$x_{\text{CO}_2} = \frac{1,09 \cdot 100}{12,895} = 8,453 \text{ \%}.$$

Аналогічним чином перераховують усі інші продукти згоряння, а їх склад і об'єми вказують у табличному вигляді (див. табл. 1.14).

Таблиця 1.14 – Склад і об'єми продуктів згоряння природного газу

Найменування компонентів	Кількість компонентів у продуктах згоряння	
	в одиницях об'єму, м ³ /м ³	у відсотках, %
CO ₂	1,09	8,453
SO ₂	0,035	0,272
N ₂	9,23	71,578
O ₂	0,407	3,156
H ₂ O	2,133	16,541
Усього:	12,895	100

Далі складають матеріальний баланс горіння газу з розрахунків на 100 м³ газового палива у вигляді табл. 1.15.

Таблиця 1.15 – Матеріальний баланс горіння газу

Прибуткові статті	Маса, кг	Витратні статті	Маса, кг
1. З паливом:		З димовими газами:	
MC ₄ H ₁₀ = 77,323·0,716	55,363	MCO ₂ = 1,09·100·1,964	214,076
MC ₂ H ₆ = 3,546·1,342	4,759	MSO ₂ = 0,035·100·2,858	10,003
MC ₃ H ₈ = 2,462·1,967	4,843	MN ₂ = 9,23·100·1,25	1153,75
MC ₄ H ₁₀ = 1,477·2,593	3,83	MO ₂ = 0,407·100·1,428	58,12
MC ₅ H ₁₂ = 1,182·3,219	3,805	MH ₂ O = 2,133·100·0,804	171,493
MCO ₂ = 5,319·1,964	10,45	Разом (Σ _{випр}):	1 607,442
MN ₂ = 3,645·1,25	4,556		
MH ₂ S = 3,546·1,52	5,39		
MH ₂ O = 1,5·0,804	1,206		
Разом:	94,202		
2. З повітрям:			
MO ₂ = 11,638·0,21·100·1,428	349		
MN ₂ = 11,638·0,79·100·1,25	1149,253		
MH ₂ O = 11,638·0,161·10·0,804	15,065		
Разом:	1 513,318		
Разом (Σ _{приб}):	1 607,52		

Після складання балансу розраховують розбіжність:

$$\frac{|1607,52 - 1607,442|}{1607,52} \cdot 100 \% = 0,005 \%$$

Отримане значення не перевищує 0,02 %, тобто матеріальний баланс складений правильно.

Далі розраховують нижчу теплоту згоряння газу за формулою (1.7), до якої підставляють лише ті компоненти палива, які присутні у складі робочої маси газу:

$$Q^p = 358 \cdot \text{CH}_4^p + 234 \cdot \text{H}_2\text{S}^p + 587 \cdot \text{C}_2\text{H}_4^p + 638 \cdot \text{C}_2\text{H}_6^p + 913 \cdot \text{C}_3\text{H}_8^p + 1187 \cdot \text{C}_4\text{H}_{10}^p + 1461 \cdot \text{C}_5\text{H}_{12}^p = 234 \cdot 3,546 + 358 \cdot 77,323 + 638 \cdot 3,546 + 913 \cdot 2,463 + 1187 \cdot 1,477 + 1461 \cdot 1,182 = 36\,501,7 \text{ кДж/м}^3$$

Після цього за формулою (1.35) розраховують ентальпію газової суміші продуктів згоряння газу за калориметричної температури. Для цього припускають, що температура повітря, яке надходить на горіння, дорівнює 100 °С, а фізичним теплом палива ($c_p \cdot t_p$) можна знехтувати. Для обраної температури повітря з табл. 1.12 знаходять теплоємність повітря $c_{\text{пов}} = 1,3005 \text{ кДж/(м}^3 \cdot \text{°С)}$. Тоді ентальпія газової суміші продуктів згоряння газу за калориметричної температури становитиме:

$$I_{\Gamma} = \frac{36501,7 + 1,3005 \cdot 100 \cdot 11,638}{12,895} = 2\,948,06 \text{ кДж/м}^3$$

За $I - t$ діаграмою (див. рис. 1.1) орієнтовне значення калориметричної температури горіння газу за $\alpha = 1,2$ становитиме $t_{\text{к.оп}} = 1800 \text{ °С}$. Для більш точного визначення калориметричної температури задаються двома температурами $t_1 = 1700 \text{ °С}$ та $t_2 = 1900 \text{ °С}$, які задовольняють нерівності ($t_1 < t_{\text{к.оп}} < t_2$). Для цих температур визначають ентальпії продуктів згоряння за формулами (1.36) та (1.37). Теплоємності газових компонентів (CO_2 , SO_2 , N_2 , O_2 , H_2O) продуктів згоряння за температур t_1 і t_2 знаходять у табл. 1.12, а відсотковий склад газових компонентів у продуктах згоряння газу беруть з табл. 1.14.

$$I_{\Gamma 1} = 0,01 \cdot 1700 \cdot (2,3745 \cdot 8,453 + 2,35 \cdot 0,272 + 1,4613 \cdot 71,578 + 1,5463 \cdot 3,156 + 1,8996 \cdot 16,541) = 2\,747,35 \text{ кДж/м}^3$$

$$I_{\Gamma 2} = 0,01 \cdot 1900 \cdot (2,4075 \cdot 8,453 + 2,363 \cdot 0,272 + 1,4759 \cdot 71,578 + 1,5618 \cdot 3,156 + 1,9424 \cdot 16,541) = 3\,110,177 \text{ кДж/м}^3$$

Калориметричну температуру горіння газу розраховують за формулою (1.38):

$$t_k = 1700 + \frac{(2948,06 - 2747,35) \cdot (1900 - 1700)}{(3110,177 - 2747,35)} = 1811 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Дійсну температуру горіння газу розраховують за формулою (1.39), беручи значення пірометричного коефіцієнта $\eta_{\text{п}} = 0,75$:

$$t_d = 1700 + \frac{(2948,06 \cdot 0,75 - 2747,35) \cdot (1900 - 1700)}{(3110,177 - 2747,35)} = 1404 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Приклад 2. Розрахувати процес горіння мазуту сірчистого. Склад горючої та робочої маси мазуту, а також перерахунок складу мазуту наведено у прикладі розрахунків 1 пункту 1.2.

Далі за формулою (1.16) розраховують теоретичну витрату сухого повітря для горіння 1 кг мазуту (м^3 повітря /кг мазуту), підставляючи до рівняння вміст тільки тих компонентів, які присутні у робочій масі:

$$L_0 = 0,0889 \cdot 82,438 + 0,265 \cdot 10,972 - 0,0333 \cdot (0,194 - 3,205) = 10,337 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Теоретичну витрату вологого повітря для горіння 1 кг мазуту (м^3 повітря /кг мазуту) розраховують за формулою (1.17); $d_{\text{пов}}$ обирають 11 г/кг сухого повітря:

$$L_0^{\text{вол}} = (1 + 1,61 \cdot 10^{-3} \cdot 11) \cdot 10,337 = 10,52 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Дійсні витрати сухого (L_α) і вологого ($L_\alpha^{\text{вол}}$) повітря для горіння 1 кг мазуту розраховують за формулами (1.18) та (1.19). Коефіцієнт витрати повітря (α) обирають 1,3.

$$L_\alpha = 1,3 \cdot 10,337 = 13,438 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$L_\alpha^{\text{вол}} = 1,3 \cdot 10,52 = 13,676 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Об'єми CO_2 , SO_2 , N_2 , O_2 і H_2O у продуктах згоряння мазуту розраховують за формулами (1.23, 1.25–1.28), м^3 продукту горіння /кг мазуту. Витрати водяної пари при спалюванні мазуту ($G_{\text{ф}}$) беруть 0,35 кг/кг.

$$V_{\text{CO}_2} = 0,01866 \cdot 82,438 = 1,538 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$V_{\text{SO}_2} = 0,007 \cdot 3,204 = 0,022 \text{ м}^3/\text{кг} ;$$

$$V_{\text{N}_2} = 0,79 \cdot 13,438 + 0,008 \cdot 0,291 = 10,618 \text{ м}^3/\text{кг} ;$$

$$V_{\text{O}_2} = 0,21 \cdot (1,3 - 1) \cdot 10,337 = 0,651 \text{ м}^3/\text{кг} ;$$

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = 0,0016 \cdot 11 \cdot 13,438 + 0,112 \cdot 10,972 + 0,0124 \cdot (2,5 + 100 \cdot 0,35) = 1,93 \text{ м}^3/\text{кг} .$$

Загальний об'єм продуктів повного згоряння мазуту визначають за формулою (1.29):

$$V_{\alpha} = 1,538 + 0,022 + 10,618 + 0,651 + 1,93 = 14,759 \text{ м}^3/\text{кг} .$$

Склад продуктів повного згоряння мазуту визначають за формулою (1.30), відповідно до якої вміст CO_2 у продуктах згоряння мазуту становитиме:

$$x_{\text{CO}_2} = \frac{1,538 \cdot 100}{14,759} = 10,421 \% .$$

Аналогічним чином перераховують усі інші продукти згоряння, а їх склад і об'єми вказують у табличному вигляді (див. табл. 1.16).

Таблиця 1.16 – Склад і об'єми продуктів згоряння мазуту сірчистого

Найменування компонентів	Кількість компонентів у продуктах згоряння	
	в одиницях об'єму, $\text{м}^3/\text{кг}$	у відсотках, %
CO_2	1,538	10,421
SO_2	0,022	0,149
N_2	10,618	71,943
O_2	0,651	4,41
H_2O	1,93	13,077
Усього:	14,759	100

Складають матеріальний баланс горіння мазуту з розрахунків на 100 кг мазуту у вигляді табл. 1.17.

Таблиця 1.17 – Матеріальний баланс горіння мазуту

Прибуткові статті	Маса, кг	Витратні статті	Маса, кг
1. З паливом:		З димовими газами:	
C ^p	82,438	MCO ₂ =1,538·100·1,964	302,063
H ^p	10,972	MSO ₂ =0,022·100·2,858	6,288
S ^p	3,204	MN ₂ =10,618·100·1,25	1327,25
N ^p	0,291	MO ₂ =0,651·100·1,428	92,963
O ^p	0,194	MH ₂ O=1,93·100·0,804	155,172
W ^p	2,5	Разом (Σ _{витр}):	1883,736
G _ф ·100	35		
Разом:	134,599		
2. З повітрям:			
MO ₂ =13,438·0,21·100·1,428	402,979		
MN ₂ =13,438·0,79·100·1,25	1327,003		
MH ₂ O=13,438·0,161·11·0,804	19,134		
Разом:	1749,116		
Разом (Σ _{приб}):	1883,715		

Після складання балансу розраховують розбіжність:

$$\frac{|1883,715 - 1883,736|}{1883,715} \cdot 100 \% = 0,0011 \%$$

Отримане значення не перевищує 0,02 %, тобто матеріальний баланс складений правильно.

Розрахунок нижчої теплоти згорання мазуту наведено у прикладі розрахунків 1 пункту 1.2, тому користуючись отриманим значенням $Q_H^p = 39513,3$ кДж/кг, за формулою (1.35) розраховують ентальпію газової суміші продуктів згорання мазуту за калориметричної температури. Для цього також припускають, що температура повітря, що надходить на горіння, дорівнює 100 °С, а фізичним теплом палива ($c_{п} \cdot t_{п}$) можна знехтувати. Для обраної температури повітря з табл. 1.12 знаходять теплоємність повітря $c_{пов} = 1,3005$ кДж/(м³·°С). Тоді ентальпія газової суміші продуктів згорання мазуту за калориметричної температури становитиме:

$$I_{Г} = \frac{39513,3 + 1,3005 \cdot 100 \cdot 13,438}{14,759} = 2795,64 \text{ кДж/м}^3$$

За $I - t$ діаграмою (див. рис. 1.1) орієнтовне значення калориметричної температури горіння мазуту за $\alpha = 1,3$ становитиме $t_{к.ор} = 1\,730\text{ }^\circ\text{C}$. Для більш точного визначення калориметричної температури задаються двома температурами $t_1 = 1700\text{ }^\circ\text{C}$ та $t_2 = 1800\text{ }^\circ\text{C}$, які задовольняють нерівності ($t_1 < t_{к.ор} < t_2$). Для цих температур визначають ентальпії продуктів згоряння за формулами (1.36) та (1.37). Теплоємності газових компонентів (CO_2 , SO_2 , N_2 , O_2 , H_2O) продуктів згоряння за температур t_1 і t_2 знаходять у табл. 1.12, а відсотковий склад газових компонентів у продуктах згоряння мазуту беруть з табл. 1.16.

$$I_{Г1} = 0,01 \cdot 1700 \cdot (2,3745 \cdot 10,421 + 2,35 \cdot 0,149 + 1,4613 \cdot 71,943 + 1,5463 \cdot 4,41 + 1,8996 \cdot 13,077) = 2\,751,50 \text{ кДж/м}^3;$$

$$I_{Г2} = 0,01 \cdot 1800 \cdot (2,3916 \cdot 10,421 + 2,358 \cdot 0,149 + 1,4688 \cdot 71,943 + 1,5542 \cdot 4,41 + 1,9424 \cdot 13,077) = 2\,932,04 \text{ кДж/м}^3.$$

Калориметричну температуру горіння мазуту розраховують за формулою (1.38):

$$t_{к} = 1700 + \frac{(2795,64 - 2751,50) \cdot (1800 - 1700)}{(2932,04 - 2751,50)} = 1\,724,45\text{ }^\circ\text{C}.$$

Дійсну температуру горіння мазуту розраховують за формулою (1.39), беручи значення пірометричного коефіцієнта $\eta_{п} = 0,75$:

$$t_{д} = 1700 + \frac{(2795,64 \cdot 0,75 - 2751,50) \cdot (1800 - 1700)}{(2932,04 - 2751,50)} = 1\,337\text{ }^\circ\text{C}.$$

Приклад 3. Розрахувати необхідну температуру підігріву повітря так, щоб тепло, яке є у розпорядженні мазуту сірчастого (див. приклад 2), було більшим на 20 %.

Спочатку користуючись формулою (1.41) необхідно розрахувати додаткову кількість тепла (ентальпію), яке підігріте повітря буде вносити в зону горіння. Частка підвищення тепла – x у формулі (1.41) відповідає заданому відсотку підвищення, тобто становить 0,2. Значення фізичного тепла повітря, дійсної витрати повітря та загального об'єму продуктів згоряння мазуту беруть з прикладу 2. Підставляючи ці значення до рівняння, отримують:

$$I_{дод} = 2795,64 \cdot 0,2 + \frac{1,3005 \cdot 100 \cdot 13,438}{14,759} = 677,5 \text{ кДж/м}^3.$$

Звідки шукану необхідну ентальпію підігрітого повітря розраховують за формулою (1.43):

$$I_{\text{пов}}^{\text{необ}} = \frac{677,5 \cdot 14,759}{13,438} = 744,1 \text{ кДж/м}^3.$$

За $I - t$ діаграмою для низьких температур (див. рис. 1.2) орієнтовне значення температури підігріву повітря становитиме $t_{\text{пов.ор}} = 560 \text{ }^\circ\text{C}$. Для більш точного визначення температури підігріву повітря задаються двома температурами $t_1 = 500 \text{ }^\circ\text{C}$ та $t_2 = 600 \text{ }^\circ\text{C}$, які задовольняють нерівності ($t_1 < t_{\text{пов.ор}} < t_2$). Для цих температур за формулою (1.36) визначають ентальпії повітря. Теплоємності повітря за температур t_1 і t_2 знаходять у табл. 1.12.

$$I_{\text{пов}1} = 1,3428 \cdot 500 = 671,4 \text{ кДж/м}^3;$$

$$I_{\text{пов}2} = 1,3570 \cdot 600 = 814,2 \text{ кДж/м}^3.$$

Тоді необхідну температуру підігріву повітря розраховують за формулою (1.38):

$$t_{\text{пов}} = 500 + \frac{(744,1 - 671,4) \cdot (600 - 500)}{(814,2 - 671,4)} = 551 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Задачі для практики

1. Складіть матеріальний баланс процесу горіння та визначте калориметричну і дійсну температуру горіння газу Шебелинського родовища, склад якого наведено у табл. 1.1.

2. Складіть матеріальний баланс процесу горіння та визначте калориметричну і дійсну температуру горіння мазуту малосірчистого марки ММ20, склад якого наведено у табл. 1.2.

3. Складіть матеріальний баланс процесу горіння та визначте калориметричну і дійсну температуру горіння газу Юліївського родовища, склад якого наведено у табл. 1.1.

4. Складіть матеріальний баланс процесу горіння та визначте калориметричну і дійсну температуру горіння мазуту малосірчистого марки ММ40, склад якого наведено у табл. 1.2.

5. Складіть матеріальний баланс процесу горіння та визначте калориметричну і дійсну температуру горіння газу Газлинського родовища (Узбекистан), склад якого наведено у табл. 1.1.

6. Складіть матеріальний баланс процесу горіння та визначте калориметричну і дійсну температуру горіння мазуту малосірчистого марки ММ60, склад якого наведено у табл. 1.2.

7. Складіть матеріальний баланс процесу горіння та визначте калориметричну і дійсну температуру горіння газу Дашавського родовища, склад якого наведено у табл. 1.1.

8. Складіть матеріальний баланс процесу горіння та визначте калориметричну і дійсну температуру горіння мазуту малосірчистого марки ММ80, склад якого наведено у табл. 1.2.

9. Складіть матеріальний баланс процесу горіння та визначте калориметричну і дійсну температуру горіння газу Яблунівського родовища, склад якого наведено у табл. 1.1.

10. Складіть матеріальний баланс процесу горіння та визначте калориметричну і дійсну температуру горіння мазуту сірчистого марки МС10, склад якого наведено у табл. 1.2.

11. Складіть матеріальний баланс процесу горіння та визначте калориметричну і дійсну температуру горіння газу Опішнянського родовища, склад якого наведено у табл. 1.1.

12. Складіть матеріальний баланс процесу горіння та визначте калориметричну і дійсну температуру горіння мазуту сірчистого марки МС20, склад якого наведено у табл. 1.2.

13. Складіть матеріальний баланс процесу горіння та визначте калориметричну і дійсну температуру горіння газу Наїпського родовища (Туркменістан), склад якого наведено у табл. 1.1.

14. Складіть матеріальний баланс процесу горіння та визначте калориметричну і дійсну температуру горіння мазуту сірчистого марки МС40, склад якого наведено у табл. 1.2.

15. Складіть матеріальний баланс процесу горіння та визначте калориметричну і дійсну температуру горіння газу Березівського родовища, склад якого наведено у табл. 1.1.

16. Складіть матеріальний баланс процесу горіння та визначте калориметричну і дійсну температуру горіння мазуту малосірчистого марки ММ100, склад якого наведено у табл. 1.2.

17. Складіть матеріальний баланс процесу горіння та визначте калориметричну і дійсну температуру горіння супутнього газу Долинського нафтового родовища, склад якого наведено у табл. 1.1.

1.8. Розрахунок тягодуттєвих пристроїв, що працюють за рахунок природної тяги. Димарі

Продукти згоряння палива можуть бути видалені з робочого простору печей в атмосферу системою каналів, лежаків та димар завдяки розрідженню, що утворилось під дією вентилятора, ежекторного пристрою або тільки завдяки геометричному напору у димарі. Видалення продуктів згоряння без застосування примусових пристроїв може відбуватись лише за відносно високих температур продуктів згоряння та достатньо великій висоті димаря.

Особливості розрахунків втрат напорів при русі газів у робочому просторі теплових агрегатів наведені у багатьох підручниках та навчальних посібниках з теплотехніки. Тому далі викладені розрахунки, які необхідно проводити для організації руху продуктів згоряння за рахунок природної тяги. Такий спосіб переміщення газів є найменш енерговитратним, бо не потребує додаткового обладнання на кшталт вентиляторів та димососів. Одним з таких пристроїв є димар.

Відповідно до вимог протипожежної безпеки мінімальна висота димаря береться не менше 16 м. Він повинен бути вище коника найвищої будівлі у радіусі 100 м на 5 м. За санітарними нормами проектування промислових підприємств загальна висота димаря береться більше 30 м при витраті палива до 5 т/год та більше 100 м, якщо витрати палива становлять 100–200 т/год.

Згідно з технологічним розрахунком висота димаря повинна бути такою, щоб розрідження, яке він створює за формулою (1.44) дорівнювало, H/m^2 :

$$h_p = h_T - h_{тр} - h_m, \quad (1.44)$$

де h_T – геометричний напір або тиск створений стовпом гарячих димових газів (продуктів згоряння), який виконує роль рушія димових газів у димарі і відповідно не вважається різновидом опору, H/m^2 ; $h_{тр}$ – втрати напору обумовлені тертям, H/m^2 ; h_m – місцеві опори при виході димових газів з димаря в атмосферу, H/m^2 .

Розрахункова величина розрідження, що створює димар h_p з урахуванням запасу напору у межах 20–40 %, за формулою (1.45) дорівнює, H/m^2 :

$$h_p = (1,2 \div 1,4) \cdot h_{втр}, \quad (1.45)$$

де $h_{\text{втр}}$ – втрачений напір або сума втрат напору і опорів руху каналами та димоходами на шляху переміщення продуктів згоряння від робочого простору печі до димаря, Н/м². Втрачений напір розраховується, як вже зазначалось, за допомогою методики, викладеної у курсі теплотехніки, у тому числі з використанням формул, наведених нижче. Як правило, при проектуванні печей ТТНСМ аеродинамічні розрахунки, проведені з метою визначення $h_{\text{втр}}$, передують розрахункам тягодуттєвих пристроїв.

Геометричний напір розраховується за формулою (1.46), Н/м²:

$$h_{\text{г}} = H \cdot g \cdot (\rho_t^{\text{пов}} - \rho_t^{\text{газ}}), \quad (1.46)$$

де H – висота стовпа гарячих димових газів, тобто висота димаря, м; g – прискорення вільного падіння, $g = 9,81$ м/с²; $\rho_t^{\text{пов}}$ та $\rho_t^{\text{газ}}$ – відповідно густина навколишнього повітря та димових газів за їх температури, кг/м³.

Необхідно зауважити, що геометричний напір не залежить від швидкості газів, проте залежить від їх температури та температури довкілля. При нагріванні газів на 1° вони збільшують свій об'єм на величину температурного коефіцієнта об'ємного розширення $\beta = 1/273$. Тому $\rho_t^{\text{пов}}$ та $\rho_t^{\text{газ}}$ мають бути визначені за формулою (1.47), кг/м³:

$$\rho_t = \frac{\rho_0}{1 + \beta \cdot t}, \quad (1.47)$$

де ρ_0 – густина навколишнього повітря або димових газів за їх температури t за нормальних умов, кг/м³. У розрахунках зазвичай беруть для продуктів згоряння $\rho_0 = 1,3-1,32$ кг/м³; для повітря $\rho_0 = 1,293$ кг/м³.

Втрати напору на тертя у димарі розраховуються за формулою (1.48), Н/м²:

$$h_{\text{тр}} = \xi \cdot \frac{H}{D_{\text{сер}}} \cdot \frac{v_{\text{сер}}^2}{2} \cdot \rho_{\text{сер}}^{\text{газ}}, \quad (1.48)$$

де ξ – коефіцієнт тертя димових газів об стінки димаря: для цегельних димарів $\xi = 0,035 - 0,05$, для металевих $\xi = 0,025 - 0,03$; $D_{\text{сер}}$ – середній діаметр димаря, м; $v_{\text{сер}}$ – середня швидкість газів за їх середньої температури $t_{\text{сер}}$, що розраховується за формулою (1.49), м/с:

$$v_{\text{сер}} = v_{0\text{сер}} \cdot (1 + \beta \cdot t_{\text{сер}}), \quad (1.49)$$

де $v_{0\text{сер}}$ – середня швидкість газів за нормальних умов, що розраховується за витратою газів та середнім діаметром димаря, м/с; $\rho_{\text{сер}}^{\text{газ}}$ – густина газів за їх середньої температури, кг/м³.

Для забезпечення стійкості цегляні димарі виготовляють такими, що звужуються догори, при цьому діаметр основи $D_{\text{осн}}$ повинен бути у півтора рази більше діаметра устя D_y , тобто $D_{\text{осн}} = 1,5 \cdot D_y$. Тоді середній діаметр димаря легко визначити як середнє арифметичне цих двох діаметрів, м:

$$D_{\text{сер}} = \frac{D_{\text{осн}} + D_y}{2}.$$

Для визначення D_y необхідно задатись швидкістю газів в усті v_{0y} у межах 4–5 м/с беручи до уваги, що за малих швидкостей можливі порушення тяги димаря під впливом вітру; великі швидкості (понад 6 м/с) утворюють надмірні опори у димарі.

Зазвичай діаметр устя визначається виходячи з умови незмінності кількості газів за їх постійної температури та густини, що долає будь-який перетин каналу (наприклад, устя) в одиницю часу:

$$\frac{\pi \cdot D_y^2}{4} = \frac{V_{\text{дг}}}{v_{0y}},$$

де $V_{\text{дг}}$ – кількість (витрата) димових газів, м³/год або кг/год.

Як зазначалось у п. 1.4, при русі димових газів робочим простором печі їх кількість буде збільшуватись за рахунок підсмоктування атмосферного повітря у системі димоходів, що прямують до димаря крізь нещільності димових шиберів. Тому $V_{\text{дг}}$ визначається за загальним коефіцієнтом витрати повітря з урахуванням підсмоктування атмосферного повітря за формулою (1.50):

$$V_{\text{дг}} = X_{\text{п}} \cdot (V_{\alpha} - L_{\alpha} + \alpha_{\text{заг}} \cdot L_0), \quad (1.50)$$

де $\alpha_{\text{заг}}$ – загальний коефіцієнт витрати повітря, який в окремих випадках досягає значень від 2 до 5 залежно від типу печі, або береться у розрахунках на підставі практичних даних.

Звідки D_y за формулою (1.51) становитиме, м:

$$D_y = \sqrt{\frac{V_{\text{дг}}}{0,785 \cdot v_{0y}}}. \quad (1.51)$$

Для запобігання порушень тяги діаметр устя цегляного димаря має бути не менше 0,8 м. Середню швидкість газів у димарі визначають скориставшись рівнянням (1.51) на основі розрахованого $D_{\text{сер}}$ за формулою (1.52), м/с:

$$v_{0\text{сер}} = \frac{V_{\text{д.г}}}{0,785 \cdot D_{\text{сер}}^2}. \quad (1.52)$$

Місцеві опори при виході димових газів з димаря в атмосферу розраховуються за формулою (1.53), Н/м²:

$$h_{\text{м}} = \zeta \cdot \frac{v_{\text{у}}^2}{2} \cdot \rho_{\text{у}}^{\text{газ}}, \quad (1.53)$$

де ζ – коефіцієнт місцевого опору при виході димових газів з димаря в атмосферу: $\zeta = 1,06 - 1,15$ (за малих швидкостей виходу газів приймається 1,15); $v_{\text{у}}$ – швидкість газів в усті за їх температури $t_{\text{у}}$, що розраховується за формулою (1.49), м/с; $\rho_{\text{у}}^{\text{газ}}$ – густина газів за їх температури в усті, кг/м³.

Температура газів біля основи димаря розраховується за температурою газів, що залишають піч та за падінням температури при русі газів каналами та лежаками. Температура газів в усті димаря визначається за температурою біля основи димаря та за падінням температур за висотою за формулою (1.54), °С; при цьому, необхідно попередньо задатись висотою димаря H' .

$$t_{\text{у}} = t_{\text{осн}} - H' \cdot \Delta t, \quad (1.54)$$

де $t_{\text{осн}}$ – температура газів біля основи димаря, °С; H' – орієнтовна висота димаря, яка обирається за графіком (див. рис. 1.3), м; Δt – падіння температур за висотою, яке береться у межах 1,0–1,5 °С/м у цегляному димарі та 2,0–3,0 °С/м у металевих нефутерованих трубах.

Тоді формула (1.44) набуде вигляду рівняння (1.55).

$$h_{\text{р}} = H \cdot g \cdot (\rho_{\text{т}}^{\text{пов}} - \rho_{\text{т}}^{\text{газ}}) - \xi \cdot \frac{H}{D_{\text{сер}}} \cdot \frac{v_{0\text{сер}}^2}{2} \cdot \rho_0 \cdot (1 + \beta \cdot t_{\text{сер}}) - \zeta \cdot \frac{v_{\text{у}}^2}{2} \cdot \rho_0 \cdot (1 + \beta \cdot t_{\text{у}}). \quad (1.55)$$

Висота димаря H визначається розв'язанням рівняння (1.55).

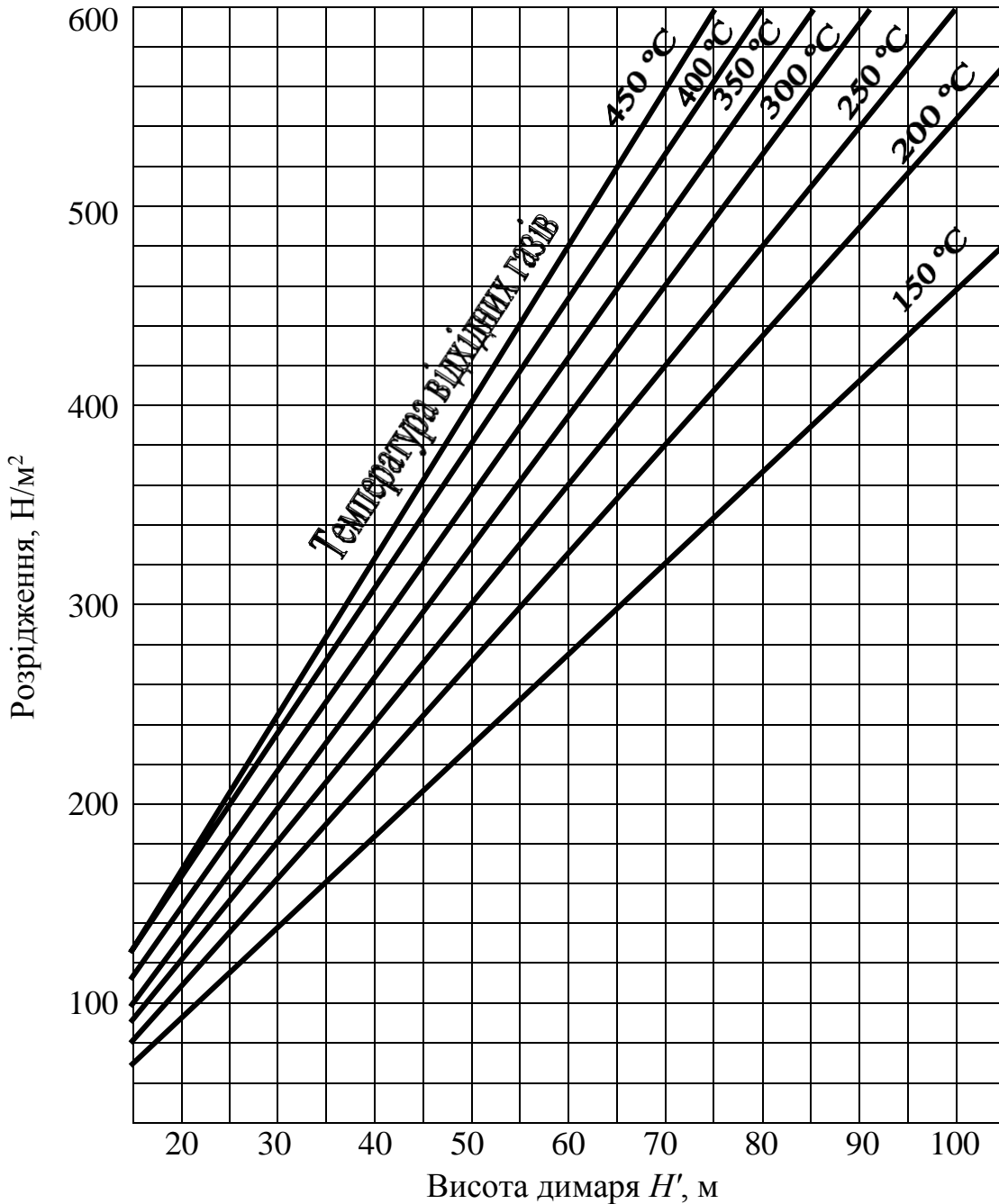


Рис. 1.3. Залежність орієнтовної висоти димаря від розрідження та середньої температури відхідних газів

Приклад розрахунку

Розрахуйте димар для видалення продуктів згоряння за такими даними: кількість (витрата) димових газів $V_{\text{дг}} = 1,8 \text{ м}^3/\text{с}$; температура газів біля основи димаря $t_{\text{осн}} = 350 \text{ °C}$, температура навколишнього повітря $t_{\text{пов}} = 20 \text{ °C}$; розрахункова величина розрідження, що його створює димар $h_p = 200 \text{ Н/м}^2$.

Для розв'язання задачі обирають цегляний димар, для якого за відомими $t_{\text{осн}} = 350 \text{ }^\circ\text{C}$ та $h_p = 200 \text{ Н/м}^2$ беруть орієнтовну висоту димаря $H' = 28 \text{ м}$ (див. рис. 1.3).

Температуру газів в усті визначають за формулою (1.54), приймаючи падіння температур за висотою для цегляного димаря $\Delta t = 1,5 \text{ }^\circ\text{C/м}$:

$$t_y = 350 - 28 \cdot 1,5 = 308 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Середня температура газів у димарі становитиме:

$$t_{\text{сеп}} = \frac{350 + 308}{2} = 329 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Густина газів за середньої температури $329 \text{ }^\circ\text{C}$ та навколишнього повітря за температури $20 \text{ }^\circ\text{C}$ визначають за формулою (1.47), приймаючи для продуктів згоряння $\rho_0 = 1,3 \text{ кг/м}^3$, для повітря $\rho_0 = 1,293 \text{ кг/м}^3$:

$$\rho_t^{\text{газ}} = \frac{1,3}{1 + \frac{329}{273}} = 0,589 \text{ кг/м}^3;$$

$$\rho_t^{\text{пов}} = \frac{1,293}{1 + \frac{20}{273}} = 1,2 \text{ кг/м}^3.$$

Далі за формулою (1.51) розраховують діаметр устя димаря, для чого задаються швидкістю газів в усті $v_{0y} = 4 \text{ м/с}$:

$$D_y = \sqrt{\frac{1,8}{0,785 \cdot 4}} = 0,76 \text{ м}.$$

Оскільки отримане значення менше $0,8 \text{ м}$, беруть $D_y = 0,8 \text{ м}$ та за формулою (1.52) перераховують швидкість газів в усті:

$$v_{0y} = \frac{1,8}{0,785 \cdot 0,8^2} = 3,58 \text{ м/с}.$$

Слід зауважити, що якщо отримане значення $D_y \geq 0,8 \text{ м}$, перерахунок v_{0y} робити не потрібно.

Користуючись значенням D_y розраховують спочатку діаметр основи димаря: $D_{\text{осн}} = 1,5 \cdot D_y = 1,5 \cdot 0,8 = 1,2$ м; а потім середній діаметр:

$$D_{\text{сер}} = \frac{1,2 + 0,8}{2} = 1,0 \text{ м.}$$

Знов за формулою (1.52) розраховують середню швидкість газів:

$$v_{0\text{сер}} = \frac{1,8}{0,785 \cdot 1,0^2} = 2,29 \text{ м/с.}$$

Обирають значення коефіцієнта тертя газів об стінки цегляного димаря $\xi = 0,035$ та коефіцієнта місцевого опору при виході газів з димаря в атмосферу $\zeta = 1,06$. Після чого записують числовий вираз рівняння (1.55):

$$200 = H \cdot 9,81 \cdot (1,2 - 0,589) - 0,035 \cdot \frac{H}{1,0} \cdot \frac{2,29^2}{2} \cdot 1,3 \cdot \left(1 + \frac{329}{273}\right) - 1,06 \cdot \frac{3,58^2}{2} \cdot 1,3 \cdot \left(1 + \frac{308}{273}\right).$$

Звідки отримують значення $H \cong 32$ м.

Отримане значення відрізняється від $H' = 28$ м більше ніж на 10 %, тому необхідно зробити перерахунок висоти димаря беручи нове значення $H' = 32$ м.

Для цього отримують нові значення температури газів в усті димаря, середньої температури та густини газів за середньої температури:

$$t_y = 350 - 32 \cdot 1,5 = 302 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$t_{\text{сер}} = \frac{350 + 302}{2} = 326 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$\rho_t^{\text{газ}} = \frac{1,3}{1 + \frac{326}{273}} = 0,59 \text{ кг/м}^3.$$

Жоден з діаметрів димаря, а також середню швидкість газів та швидкість газів в усті перераховувати не потрібно.

Підстановка перерахованих параметрів у рівняння (1.55) дає значення висоти димаря $H = 31,7$ м.

Задачі для практики

Скористайтесь розрахунками процесу горіння, що були виконані під час складання матеріального балансу заданого виду палива та визначте:

1. Кількість димових газів, що утворилась при згорянні Шебелинського газу та висоту цегляного димаря для їх видалення, якщо:

- витрата палива, $X_{\text{п}} = 340 \text{ м}^3/\text{год}$;
- загальний коефіцієнт витрати повітря, $\alpha_{\text{заг}} = 2$;
- температура повітря – $17 \text{ }^\circ\text{C}$;
- температура газів біля основи димаря – $250 \text{ }^\circ\text{C}$;
- втрати напору димових газів, $h_{\text{втр}} = 150 \text{ Н/м}^2$;
- коефіцієнти тертя газів та місцевих опорів відповідно – $0,035$ та $1,06$.

2. Кількість димових газів, що утворилась при згорянні мазуту марки ММ20 та висоту цегляного димаря для їх видалення, якщо:

- витрата палива, $X_{\text{п}} = 342 \text{ кг/год}$;
- загальний коефіцієнт витрати повітря, $\alpha_{\text{заг}} = 2,05$;
- температура повітря – $18 \text{ }^\circ\text{C}$;
- температура газів біля основи димаря – $260 \text{ }^\circ\text{C}$;
- втрати напору димових газів, $h_{\text{втр}} = 160 \text{ Н/м}^2$;
- коефіцієнти тертя газів та місцевих опорів відповідно – $0,036$ та $1,065$.

3. Кількість димових газів, що утворилась при згорянні Юліївського газу та висоту цегляного димаря для їх видалення, якщо:

- витрата палива, $X_{\text{п}} = 344 \text{ м}^3/\text{год}$;
- загальний коефіцієнт витрати повітря, $\alpha_{\text{заг}} = 2,1$;
- температура повітря – $19 \text{ }^\circ\text{C}$;
- температура газів біля основи димаря – $265 \text{ }^\circ\text{C}$;
- втрати напору димових газів, $h_{\text{втр}} = 165 \text{ Н/м}^2$;
- коефіцієнти тертя газів та місцевих опорів відповідно – $0,037$ та $1,07$.

4. Кількість димових газів, що утворилась при згорянні мазуту марки ММ40 та висоту цегляного димаря для їх видалення, якщо:

- витрата палива, $X_{\text{п}} = 346 \text{ кг/год}$;
- загальний коефіцієнт витрати повітря, $\alpha_{\text{заг}} = 2,15$;
- температура повітря – $21 \text{ }^\circ\text{C}$;
- температура газів біля основи димаря – $270 \text{ }^\circ\text{C}$;
- втрати напору димових газів, $h_{\text{втр}} = 170 \text{ Н/м}^2$;

- коефіцієнти тертя газів та місцевих опорів відповідно – 0,038 та 1,075.

5. Кількість димових газів, що утворилась при згорянні Газлинського газу та висоту цегляного димаря для їх видалення, якщо:

- витрата палива, $X_{\text{п}} = 348 \text{ м}^3/\text{год}$;
- загальний коефіцієнт витрати повітря, $\alpha_{\text{заг}} = 2,2$;
- температура повітря – 22 °С;
- температура газів біля основи димаря – 280 °С;
- втрати напору димових газів, $h_{\text{втр}} = 175 \text{ Н/м}^2$;
- коефіцієнти тертя газів та місцевих опорів відповідно – 0,039 та 1,08.

6. Кількість димових газів, що утворилась при згорянні мазуту марки ММ60 та висоту цегляного димаря для їх видалення, якщо:

- витрата палива, $X_{\text{п}} = 350 \text{ кг/год}$;
- загальний коефіцієнт витрати повітря, $\alpha_{\text{заг}} = 2,25$;
- температура повітря – 23 °С;
- температура газів біля основи димаря – 285 °С;
- втрати напору димових газів, $h_{\text{втр}} = 180 \text{ Н/м}^2$;
- коефіцієнти тертя газів та місцевих опорів відповідно – 0,04 та 1,085.

7. Кількість димових газів, що утворилась при згорянні Дашавського газу та висоту цегляного димаря для їх видалення, якщо:

- витрата палива, $X_{\text{п}} = 352 \text{ м}^3/\text{год}$;
- загальний коефіцієнт витрати повітря, $\alpha_{\text{заг}} = 2,3$;
- температура повітря – 24 °С;
- температура газів біля основи димаря – 290 °С;
- втрати напору димових газів, $h_{\text{втр}} = 185 \text{ Н/м}^2$;
- коефіцієнти тертя газів та місцевих опорів відповідно – 0,041 та 1,09.

8. Кількість димових газів, що утворилась при згорянні мазуту марки ММ80 та висоту цегляного димаря для їх видалення, якщо:

- витрата палива, $X_{\text{п}} = 354 \text{ кг/год}$;
- загальний коефіцієнт витрати повітря, $\alpha_{\text{заг}} = 2,35$;
- температура повітря – 25 °С;
- температура газів біля основи димаря – 300 °С;
- втрати напору димових газів, $h_{\text{втр}} = 195 \text{ Н/м}^2$;
- коефіцієнти тертя газів та місцевих опорів відповідно – 0,042 та 1,095.

9. Кількість димових газів, що утворилась при згорянні Яблунівського газу та висоту цегляного димаря для їх видалення, якщо:

- витрата палива, $X_{\text{п}} = 356 \text{ м}^3/\text{год}$;
- загальний коефіцієнт витрати повітря, $\alpha_{\text{заг}} = 2,4$;
- температура повітря – $26 \text{ }^\circ\text{C}$;
- температура газів біля основи димаря – $305 \text{ }^\circ\text{C}$;
- втрати напору димових газів, $h_{\text{втр}} = 195 \text{ Н/м}^2$;
- коефіцієнти тертя газів та місцевих опорів відповідно – $0,043$ та $1,1$.

10. Кількість димових газів, що утворилась при згорянні мазуту марки МС10 та висоту цегляного димаря для їх видалення, якщо:

- витрата палива, $X_{\text{п}} = 358 \text{ кг/год}$;
- загальний коефіцієнт витрати повітря, $\alpha_{\text{заг}} = 2,45$;
- температура повітря – $27 \text{ }^\circ\text{C}$;
- температура газів біля основи димаря – $310 \text{ }^\circ\text{C}$;
- втрати напору димових газів, $h_{\text{втр}} = 200 \text{ Н/м}^2$;
- коефіцієнти тертя газів та місцевих опорів відповідно – $0,044$ та $1,11$.

11. Кількість димових газів, що утворилась при згорянні газу Опіш-нянського родовища та висоту цегляного димаря для їх видалення, якщо:

- витрата палива, $X_{\text{п}} = 360 \text{ м}^3/\text{год}$;
- загальний коефіцієнт витрати повітря, $\alpha_{\text{заг}} = 2,5$;
- температура повітря – $28 \text{ }^\circ\text{C}$;
- температура газів біля основи димаря – $320 \text{ }^\circ\text{C}$;
- втрати напору димових газів, $h_{\text{втр}} = 210 \text{ Н/м}^2$;
- коефіцієнти тертя газів та місцевих опорів відповідно – $0,045$ та $1,12$.

12. Кількість димових газів, що утворилась при згорянні мазуту марки МС20 та висоту цегляного димаря для їх видалення, якщо:

- витрата палива, $X_{\text{п}} = 345 \text{ кг/год}$;
- загальний коефіцієнт витрати повітря, $\alpha_{\text{заг}} = 2$;
- температура повітря – $29 \text{ }^\circ\text{C}$;
- температура газів біля основи димаря – $325 \text{ }^\circ\text{C}$;
- втрати напору димових газів, $h_{\text{втр}} = 220 \text{ Н/м}^2$;
- коефіцієнти тертя газів та місцевих опорів відповідно – $0,046$ та $1,13$.

13. Кількість димових газів, що утворилась при згорянні Наїпського газу та висоту цегляного димаря для їх видалення, якщо:

- витрата палива, $X_{\text{п}} = 347 \text{ м}^3/\text{год}$;
- загальний коефіцієнт витрати повітря, $\alpha_{\text{заг}} = 2,05$;
- температура повітря – $30 \text{ }^\circ\text{C}$;
- температура газів біля основи димаря – $330 \text{ }^\circ\text{C}$;
- втрати напору димових газів, $h_{\text{втр}} = 230 \text{ Н/м}^2$;

- коефіцієнти тертя газів та місцевих опорів відповідно – 0,047 та 1,14.

14. Кількість димових газів, що утворилась при згорянні мазуту марки МС40 та висоту цегляного димаря для їх видалення, якщо:

- витрата палива, $X_{\text{п}} = 350$ кг/год;
- загальний коефіцієнт витрати повітря, $\alpha_{\text{заг}} = 2,1$;
- температура повітря – 17 °С;
- температура газів біля основи димаря – 340 °С;
- втрати напору димових газів, $h_{\text{втр}} = 240$ Н/м²;
- коефіцієнти тертя газів та місцевих опорів відповідно – 0,048 та 1,15.

15. Кількість димових газів, що утворилась при згорянні Березівського газу та висоту цегляного димаря для їх видалення, якщо:

- витрата палива, $X_{\text{п}} = 349$ м³/год;
- загальний коефіцієнт витрати повітря, $\alpha_{\text{заг}} = 2,15$;
- температура повітря – 18 °С;
- температура газів біля основи димаря – 350 °С;
- втрати напору димових газів, $h_{\text{втр}} = 250$ Н/м²;
- коефіцієнти тертя газів та місцевих опорів відповідно – 0,049 та 1,15.

Список літератури до розділу 1

1. Панкратов Г. П. Сборник задач по общей теплотехнике: учеб. пособ. / Г. П. Панкратов. – М.: Высшая школа, 1977. – 239 с.
2. Пиоро Л. С. Экономия топлива в производстве стекла / Л. С. Пиоро. – Киев: Наукова думка, 1981. – 139 с.
3. Тепловые процессы в технологии силикатных материалов: учебник для вузов. / И. А. Булавин, И. А. Макаров, А. Я. Рапопорт, В. К. Хохлов. – М.: Стройиздат, 1982. – 243 с.
4. Перегудов В. В. Тепловые процессы и установки в технологии строительных изделий и деталей: учебник для вузов. / В. В. Перегудов, М. И. Роговой. – М.: Стройиздат, 1983. – 416 с.
5. Лариков Н. Н. Теплотехника. учебник для вузов. / Н. Н. Лариков. – М.: Стройиздат, 1985. – 432 с.
6. Четкин А. В. Теплотехника: учебник для хим.-техн. спец. вузов / А. В. Четкин, Н. А. Занемонец. – М.: Высшая школа, 1986. – 344 с.
7. Левченко П. В. Расчеты печей и сушил силикатной промышленности / П. В. Левченко. – М.: Высшая школа, 1968. – 366 с.
8. Ралко А. В. Тепловые процессы в технологии силикатов: учебник для вузов / А. В. Ралко, А. А. Крупа, Н. Н. Племянников и др. – Киев: Выща школа, Головное изд-во, 1986. – 232 с.

9. Ралко А. В. Теплотехника, тепловые процессы и агрегаты в технологии тугоплавких неметаллических и силикатных материалов / А. В. Ралко, А. А. Крупа, Н. Н. Племянников. – Киев: УМК ВО, 1993. – 396 с.
10. Гойхман В. Ю. Печная теплотехника в производстве стекла: техн. пособ. / В. Ю. Гойхман, В. Н. Руслов, В. А. Костыря. – Харьков: Факт, 1997. – 288 с.
11. Драганов Б. Х. Теплотехніка / Б. Х. Драганов, А. А. Долинський, А. В. Мінденко, К. М. Письмений. – Київ: Вища школа, 2005.
12. Шестаков В. Л. Задачі та вправи з технічної термодинаміки та теплових процесів технології будівельних матеріалів: навч. посіб. / В. Л. Шестаков. – Рівне: НУВГП, 2006.
13. Теплотехніка / Електронний конспект лекцій [Електронний ресурс]. – Київ: КНУДТ, 2012. – 98 с. Режим доступу: <http://www.twirpx.com/files/tek/warming>.
14. Гоц В. І. Теплові процеси та установки у виробництві будівельних конструкцій, виробів і матеріалів / В. І. Гоц, В. М. Кошкар'юв, В. В. Павлюк, С. А. Тимошенко. – Київ: Основа, 2014. – 472 с.
15. Сардак Е. М. Теплові процеси і агрегати в технології тугоплавких неметалевих та силікатних матеріалів: навч. посіб. / Е. М. Сардак, В. І. Голєус, О. В. Зайчук. – Дніпропетровськ: ДВНЗ УДХТУ, 2015. – 248 с.

Розділ 2

РОЗРАХУНКИ ТЕПЛООБМІНУ В РОБОЧОМУ ПРОСТОРИ ПЕЧЕЙ

Тепло, яке утворюється у процесі горіння палива, у робочому просторі печі передається на поверхню виробів або матеріалів, що нагріваються, а також на внутрішню поверхню футерівки (вогнетривкої кладки). У результаті теплообміну відбувається нагрів шихтових матеріалів або виробів, нагрів транспортуючих пристроїв та передача тепла крізь стінки печі у довкілля. Інтенсивність цих процесів теплообміну залежить від конструкції печі, методу спалювання палива та температурного режиму роботи.

У полум'яних високотемпературних печах з великим вільним об'ємом робочого простору (скловарні печі, зони спікання обертових печей), основним теплоносієм є палаючий факел, що утворюється в робочому просторі, а також продукти згоряння, що рухаються від паливоспалювальних пристроїв до димоходів. У таких печах внутрішня поверхня кладки печі відіграє роль другорядного випромінювача тепла. Випромінювання кладки досягає 40–60 % від загальної кількості тепла, що передається на поверхню матеріалів.

У печах, де робочий простір заповнений матеріалами або виробами, що випалюються (шахтні, тунельні), основним теплоносієм є продукти горіння, які рухаються вузькими та викрученими каналами всередині садки виробів. При цьому важливе значення у процесі тепловіддачі має рівномірність та швидкість руху газів у перетині робочого простору.

Теплообмін у робочому просторі печей при нагріванні або охолодженні матеріалів поділяють на зовнішній та внутрішній. Зовнішній теплообмін характеризується процесами тепловіддачі від газів, що рухаються, на поверхню матеріалів, що нагріваються, а також між футерівкою та поверхнею цих матеріалів. Внутрішній теплообмін характеризується процесами теплопровідності матеріалів (виробів) та підвищенням їх тепловмісту. Прогрів футерівки також належить до внутрішнього теплообміну.

2.1. Розрахунки тепловіддачі газів та кладки на поверхню матеріалу

У скловарних печах або у зонах високих температур обертових і тунельних печей основним видом тепловіддачі газів на внутрішню поверхню кладки та матеріалу є випромінювання. Конвективний теплообмін

превалює над радіаційним за знижених температур газів (600 °С) та за відносно високих швидкостях руху (3–5 м/с). За цих умов коефіцієнт тепловіддачі випромінюванням не перевищує 10–12 Вт/(м²·°С). Руху газів крізь шар матеріалу властивий променевий тепловий потік, який не перевищує 6 Вт/(м²·°С). У цьому випадку основним видом тепловіддачі є конвекція.

Випромінююча здатність газів залежить від ступеня їх чорноти та температури. При розрахунках випромінювання газів у робочому просторі печей зазвичай враховують, що продукти згоряння рівномірно заповнюють весь об'єм пічного простору. Ступені чорноти газів СО₂ та Н₂О знаходять за допомогою графіків (залежно від їх температури та добутку парціального тиску на ефективну товщину газового шару), які дають можливість визначити загальний ступінь чорноти газової суміші.

Для розрахунку теплового потоку випромінюванням від газів на поверхню стінок (або навпаки, якщо температура стінок є вищою за температуру газів) можна скористатись спрощеною формулою Г. Л. Поляка, Вт:

$$Q_{\text{вип}} = \frac{5,7}{\frac{1}{\varepsilon_{\text{ст}}} + \frac{1}{\varepsilon_{\text{газ}}} - 1} \left[\left(\frac{T_{\text{газ}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{ст}}}{100} \right)^4 \right] \cdot F, \quad (2.1)$$

де 5,7 Вт/(м²·К⁴) – коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла; $\varepsilon_{\text{ст}}$ та $\varepsilon_{\text{газ}}$ – відповідно ступені чорноти стінки та газу; $T_{\text{газ}}$ та $T_{\text{ст}}$ – абсолютна температура газів та стінок, К; F – поверхня стінок, що відгороджують цей об'єм газу, м².

Сумарний тепловий потік від газів та внутрішньої поверхні кладки печі на поверхню матеріалу, що нагрівається можна визначити за формулою (2.2), Вт:

$$Q_{\text{м}} = c_{\text{в}} \cdot \left[\left(\frac{T_{\text{газ}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{ст}}}{100} \right)^4 \right] \cdot F_{\text{м}}, \quad (2.2)$$

де $c_{\text{в}}$ – видимий коефіцієнт випромінювання від газів та кладки на поверхню матеріалу, Вт/(м²·К⁴); $T_{\text{газ}}$ та $T_{\text{м}}$ – абсолютна температура газів та матеріалу, що нагрівається, К; $F_{\text{м}}$ – поверхня матеріалу, що сприймає випромінювання, м².

Видимий коефіцієнт випромінювання від газів та кладки на поверхню матеріалу можна визначити за формулою Д. В. Будріна, Вт/(м²·К⁴):

$$c_{\text{в}} = 5,7 \cdot \varepsilon_{\text{м}} \cdot K, \quad (2.3)$$

де ε_M – ступінь чорноти поверхні матеріалу; K – допоміжний множник, який визначається за формулою (2.4), або за допомогою графіка залежності допоміжного множника від ступеня чорноти газів.

$$K = \frac{\omega + 1 - \varepsilon_{\text{газ}}}{\beta \cdot \frac{1 - \varepsilon_{\text{газ}}}{\varepsilon_{\text{газ}}} + \omega}, \quad (2.4)$$

де ω – ступінь розвитку кладки, або коефіцієнт, який дорівнює відношенню загальної внутрішньої поверхні кладки F_K до поверхні матеріалу (виробів), що сприймає випромінювання F_M ; $\beta = \varepsilon_M + \varepsilon_{\text{газ}} \cdot (1 - \varepsilon_M)$.

Слід зауважити, що практичні розрахунки високотемпературних печей потребують урахування впливу на величину K тепловіддачі конвекцією від газів на кладку та поверхню матеріалів, проте теплові втрати кладки в навколишнє середовище теплопровідністю зменшують загальну кількість тепла. Тому з незначною похибкою внеском тепловіддачі конвекцією можна знехтувати, що спрощує розв'язання задачі.

Для визначення температури внутрішньої поверхні кладки у зонах високих температур, яку необхідно знати для розрахунків втрат тепла теплопровідністю у навколишнє середовище, можна скористатись формулою (2.5), K :

$$T_K = \sqrt[4]{\frac{T_M^4 + \psi \cdot (T_{\text{газ}}^4 - T_M^4)}{K}}, \quad (2.5)$$

де множник ψ можна визначити за формулою (2.4):

$$\psi = \frac{\omega + 1 - \beta}{\beta \cdot \frac{1 - \varepsilon_{\text{газ}}}{\varepsilon_{\text{газ}}} + \omega}.$$

Зазвичай значення β знаходяться у межах від 0,85 до 0,95.

Якщо є відомими температури T_M та T_K , то температуру газів можна визначити за формулою (2.6), K :

$$T_{\text{газ}} = \sqrt[4]{\frac{T_K^4 - T_M^4 \cdot (1 - \psi)}{\psi}}. \quad (2.6)$$

Приклади розрахунків

Приклад 1. Визначити кількість тепла від газів та кладки конвеєрної роликової печі на поверхню плиток у секції випалу, а також температуру

внутрішньої поверхні кладки, якщо температура продуктів згоряння (газів) $T_{\text{газ}} = 1150 \text{ }^\circ\text{C}$, температура плиток $T_{\text{м}} = 1080 \text{ }^\circ\text{C}$; ступінь чорноти продуктів згоряння $\varepsilon_{\text{газ}} = 0,2$; ступінь чорноти поверхні матеріалу (плиток) $\varepsilon_{\text{м}} = 0,75$; довжина секції випалу – 3 м, ширина та висота пічного каналу відповідно – 0,9 та 0,62 м.

Необхідно розрахувати сумарний тепловий потік від газів та внутрішньої поверхні кладки печі на поверхню плиток за формулою (2.2). Попередньо слід визначити видимий коефіцієнт випромінювання від газів та кладки на поверхню плиток за формулою (2.3) та поверхню плиток, що сприймає випромінювання.

Для того щоб скористатись формулою (2.3), спочатку розраховують ступінь розвитку кладки, який є необхідним для визначення допоміжного множника K . При цьому враховують конструктивні особливості робочого каналу конвеєрної печі, а саме:

- загальна внутрішня поверхня кладки $F_{\text{к}}$ може бути наближено розрахована як сума площ двох поздовжніх та однієї верхньої поверхонь вогнетривкої футерівки робочого каналу секції випалу;
- поверхня плиток, що сприймає випромінювання $F_{\text{м}}$ наближено відповідає площі конвеєра в секції випалу, і разом з $F_{\text{к}}$ може бути розрахована за наданими (відомими) розмірами секції.

Тоді шукана ступінь розвитку кладки становитиме:

$$\omega = \frac{F_{\text{к}}}{F_{\text{м}}} = \frac{2 \cdot 3 \cdot 0,62 + 0,9 \cdot 3}{0,9 \cdot 3} = 2,37.$$

Знаходять $\beta = \varepsilon_{\text{м}} + \varepsilon_{\text{газ}} \cdot (1 - \varepsilon_{\text{м}}) = 0,75 + 0,2 \cdot (1 - 0,75) = 0,8$.

Після чого за формулою (2.4) визначають значення допоміжного множника K :

$$K = \frac{2,37 + 1 - 0,2}{0,8 \cdot \frac{1 - 0,2}{0,2} + 2,37} = 0,57.$$

Далі за формулою (2.3) визначають видимий коефіцієнт випромінювання від газів та кладки на поверхню плиток:

$$c_{\text{в}} = 5,7 \cdot 0,75 \cdot 0,57 = 2,437 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4).$$

Тоді сумарний тепловий потік від газів та внутрішньої поверхні футерівки печі (за температури $T_{\text{газ}} = t_{\text{газ}} + 273 = 1150 + 273 = 1423 \text{ К}$) на поверхню плиток (за температури $T_{\text{м}} = 1080 + 273 = 1353 \text{ К}$) у секції випалу за формулою (2.2) становитиме:

$$Q_M = 2,437 \cdot \left[\left(\frac{1423}{100} \right)^4 - \left(\frac{1353}{100} \right)^4 \right] \cdot 2,7 = 49\,297 \text{ Вт.}$$

Після чого визначають температуру внутрішньої поверхні кладки за формулою (2.5), попередньо розрахувавши значення множника ψ :

$$\psi = \frac{\omega + 1 - \beta}{1 - \varepsilon_{\text{газ}}} = \frac{2,37 + 1 - 0,8}{1 - 0,2} = 0,46.$$

$$\beta \cdot \frac{1}{\varepsilon_{\text{газ}}} + \omega = 0,8 \cdot \frac{1}{0,2} + 2,37$$

Тоді

$$T_K = \sqrt[4]{T_M^4 + \psi \cdot (T_{\text{газ}}^4 - T_M^4)} = \sqrt[4]{1353^4 + 0,46 \cdot (1423^4 - 1353^4)} = 1\,386 \text{ К}$$

або 1 113 °С.

Приклад 2. Визначити кількість тепла, що його сприймає скломаса від газів та кладки ванної скловарної печі, а також температуру внутрішньої поверхні кладки, якщо температура газів $T_{\text{газ}} = 1650$ °С, температура скломаси $T_M = 1400$ °С; ступінь чорноти газів $\varepsilon_{\text{газ}} = 0,22$; ступінь чорноти скломаси $\varepsilon_M = 0,82$; ширина та довжина варильної частини печі (розміри ванни) відповідно – 6 та 12,5 м, висота полум'яного простору – 1,75 м.

Спочатку розраховують ступінь розвитку кладки, враховуючи конструктивні особливості варильної частини ванної скловарної печі, а саме:

- загальна внутрішня поверхня кладки F_K може бути наближено розрахована як сума площ двох бокових та двох поздовжніх поверхонь полум'яного простору, а також площі поверхні склепіння вогнетривкої футерівки варильної частини печі;
- поверхня скломаси, що сприймає випромінювання F_M , наближено відповідає площі варильної частини, і разом з F_K може бути розрахована за наданими (відомими) розмірами ванни.

Тоді шукана ступінь розвитку кладки становитиме:

$$\omega = \frac{F_K}{F_M} = \frac{2 \cdot 12,5 \cdot 1,75 + 2 \cdot 6 \cdot 1,75 + 12,5 \cdot 6}{12,5 \cdot 6} = 1,86.$$

Знаходять $\beta = 0,82 + 0,22 \cdot (1 - 0,82) = 0,86$.

Після чого за формулою (2.4) визначають значення допоміжного множника K :

$$K = \frac{1,86+1 - 0,22}{0,86 \cdot \frac{1-0,22}{0,22} + 1,86} = 0,538.$$

Далі за формулою (2.3) визначають видимий коефіцієнт випромінювання від газів та кладки на поверхню плиток:

$$c_B = 5,7 \cdot 0,82 \cdot 0,538 = 2,51 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4).$$

Тоді сумарний тепловий потік від газів та внутрішньої поверхні футерівки печі (за температури $T_{\text{газ}} = t_{\text{газ}} + 273 = 1650 + 273 = 1923 \text{ К}$) на поверхню скломаси (за температури $T_M = 1400 + 273 = 1673 \text{ К}$), за формулою (2.2) становитиме:

$$Q_M = 0,001 \cdot 2,51 \cdot \left[\left(\frac{1923}{100} \right)^4 - \left(\frac{1673}{100} \right)^4 \right] \cdot 75 = 11\,000 \text{ кВт}.$$

Після чого визначають температуру внутрішньої поверхні кладки за формулою (2.5), попередньо розрахувавши значення множника ψ :

$$\psi = \frac{1,86 + 1 - 0,86}{0,86 \cdot \frac{1-0,22}{0,22} + 1,86} = 0,408.$$

Тоді

$$T_K = \sqrt[4]{T_M^4 + \psi \cdot (T_{\text{газ}}^4 - T_M^4)} = \sqrt[4]{1673^4 + 0,408 \cdot (1923^4 - 1673^4)} = 1\,780 \text{ К}$$

або $1\,507 \text{ }^\circ\text{С}$.

Задачі для практики

За допомогою методики, викладеної у розділі 1 (п. 1.6), розрахуйте за наведеним складом димових газів (продуктів згоряння) вказаного виду палива їх температуру, а також визначте:

1. Тепловий потік від димових газів та кладки конвекційної печі у секції випалу на поверхню плиток, а також температуру внутрішньої поверхні кладки, якщо температура плиток $1100 \text{ }^\circ\text{С}$; $\epsilon_{\text{газ}} = 0,2$; $\epsilon_M = 0,82$; ширина та висота пічного каналу відповідно $1,15$ та $0,73$ м; довжина секції – $2,5$ м. Склад продуктів згоряння, дійсні витрати сухого повітря для горіння та теплотворність мазуту наведено у табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Склад продуктів згорання, дійсні витрати сухого повітря для горіння та теплотворність деяких видів палива

Номер задачі	Склад продуктів згорання, в одиницях об'єму					L_{α} , м ³ /м ³ або м ³ /кг	Q_H^p , кДж/м ³ або кДж/кг
	CO ₂	SO ₂	N ₂	O ₂	H ₂ O		
1	1,538	0,022	10,618	0,651	1,952	13,438	39773
2	1,090	0,035	9,230	0,407	2,133	11,638	35824
3	1,55	0,019	10,765	0,66	1,885	13,628	40099
4	0,985	–	9,59	0,588	2,165	12,142	35133
5	1,564	0,006	9,598	0,425	1,66	12,145	38698
6	1,011	–	10,539	0,799	2,213	13,328	35845
7	0,985	–	8,627	0,38	2,065	10,845	34060
8	1,534	0,022	10,605	0,651	1,921	13,423	39456
9	0,993	–	8,87	0,39	2,136	11,189	35107
10	1,572	0,008	10,05	0,445	1,789	12,721	40585
11	1,073	–	9,54	0,422	2,24	12,072	37669

2. Тепловий потік від димових газів та кладки конвеєрної печі у секції випалу на поверхню плиток, а також температуру внутрішньої поверхні кладки, якщо температура плиток 1120 °С; $\epsilon_{\text{газ}} = 0,21$; $\epsilon_{\text{м}} = 0,8$; ширина та висота пічного каналу відповідно 1,3 та 0,75 м; довжина секції – 2,6 м. Склад продуктів згорання, дійсні витрати сухого повітря для горіння та теплотворність природного газу наведено у табл. 2.1.

3. Тепловий потік від димових газів та кладки конвеєрної печі у двох секціях випалу на поверхню плиток, а також температуру внутрішньої поверхні кладки, якщо температура плиток 1020 °С; $\epsilon_{\text{газ}} = 0,23$; $\epsilon_{\text{м}} = 0,77$; ширина та висота пічного каналу відповідно 1,1 та 0,65 м; довжина секції – 2,8 м. Склад продуктів згорання, дійсні витрати сухого повітря для горіння та теплотворність мазуту наведено у табл. 2.1.

4. Тепловий потік від димових газів та кладки конвеєрної печі у чотирьох секціях випалу на поверхню плиток, а також температуру внутрішньої поверхні кладки, якщо температура плиток 1000 °С; $\epsilon_{\text{газ}} = 0,25$; $\epsilon_{\text{м}} = 0,79$; ширина та висота пічного каналу відповідно 0,9 та 0,47 м; довжина секції – 2,95 м. Склад продуктів згорання, дійсні витрати сухого повітря для горіння та теплотворність природного газу наведено у табл. 2.1.

5. Тепловий потік від димових газів та кладки конвеєрної печі у трьох секціях випалу на поверхню плиток, а також температуру внутрішньої поверхні кладки, якщо температура плиток 1050 °С; $\epsilon_{\text{газ}} = 0,24$; $\epsilon_{\text{м}} = 0,78$; ширина та висота пічного каналу відповідно 0,86 та 0,42 м; довжина секції – 2,9 м. Склад продуктів згорання, дійсні витрати сухого повітря для горіння та теплотворність мазуту наведено у табл. 2.1.

6. Тепловий потік від димових газів та кладки ванної печі на поверхню скломаси, а також температуру внутрішньої поверхні кладки, якщо температура скломаси $1500\text{ }^{\circ}\text{C}$; $\epsilon_{\text{газ}} = 0,22$; $\epsilon_{\text{м}} = 0,82$; розміри ванни 8 на 19 м; висота полум'яного простору 1,7 м. Склад продуктів згоряння, дійсні витрати сухого повітря для горіння та теплотворність природного газу наведено у табл. 2.1.

7. Тепловий потік від димових газів та кладки ванної печі на поверхню скломаси, а також температуру внутрішньої поверхні кладки, якщо температура скломаси $1430\text{ }^{\circ}\text{C}$; $\epsilon_{\text{газ}} = 0,22$; $\epsilon_{\text{м}} = 0,82$; розміри ванни 7 на 21 м; висота полум'яного простору 1,55 м. Склад продуктів згоряння, дійсні витрати сухого повітря для горіння та теплотворність природного газу наведено у табл. 2.1.

8. Тепловий потік від димових газів та кладки ванної печі на поверхню скломаси, а також температуру внутрішньої поверхні кладки, якщо температура скломаси $1580\text{ }^{\circ}\text{C}$; $\epsilon_{\text{газ}} = 0,22$; $\epsilon_{\text{м}} = 0,82$; розміри ванни 6 на 15 м; висота полум'яного простору 1,5 м. Склад продуктів згоряння, дійсні витрати сухого повітря для горіння та теплотворність мазуту наведено у табл. 2.1.

9. Тепловий потік від димових газів та кладки ванної печі на поверхню скломаси, а також температуру внутрішньої поверхні кладки, якщо температура скломаси $1460\text{ }^{\circ}\text{C}$; $\epsilon_{\text{газ}} = 0,22$; $\epsilon_{\text{м}} = 0,82$; розміри ванни 7 на 17 м; висота полум'яного простору 1,4 м. Склад продуктів згоряння, дійсні витрати сухого повітря для горіння та теплотворність природного газу наведено у табл. 2.1.

10. Тепловий потік від димових газів та кладки ванної печі на поверхню скломаси, а також температуру внутрішньої поверхні кладки, якщо температура скломаси $1600\text{ }^{\circ}\text{C}$; $\epsilon_{\text{газ}} = 0,22$; $\epsilon_{\text{м}} = 0,82$; розміри ванни 8 на 25 м; висота полум'яного простору 1,75 м. Склад продуктів згоряння, дійсні витрати сухого повітря для горіння та теплотворність мазуту наведено у табл. 2.1.

11. Тепловий потік від димових газів та кладки конвеєрної печі в секції випалу на поверхню плиток, а також температуру внутрішньої поверхні кладки, якщо температура плиток $1030\text{ }^{\circ}\text{C}$; $\epsilon_{\text{газ}} = 0,23$; $\epsilon_{\text{м}} = 0,87$; ширина та висота пічного каналу відповідно – 0,86 та 0,5 м; довжина секції – 2,85 м. Склад продуктів згоряння, дійсні витрати сухого повітря для горіння та теплотворність природного газу наведено у табл. 2.1.

2.2. Розрахунки прогріву пічних стінок

При вивченні теплових процесів, що відбуваються у теплотехнічних агрегатах ТТНСМ, а саме при сушінні та випалі кераміки або при отриманні силікатних розплавів, доводиться вирішувати складні математичні задачі, пов'язані з установленням зв'язку між часовими та просторовими змінами температури тіла і його масовістом. Цей зв'язок подано у вигляді складних взаємопов'язаних диференціальних рівнянь переносу теплоти та речовини або диференціальних рівнянь теплопровідності та масопровідності.

Розв'язання практичних задач, пов'язаних з розрахунками прогріву пічних стінок, можна суттєво спростити, якщо скористатись граничними умовами першого, другого та третього роду, які враховують природу теплообміну.

1. Гранична умова першого роду полягає у заданні розподілу температури поверхнею тіла улюбий момент часу. У простішому випадку температура на поверхні тіла, що нагрівається, залишається незмінною впродовж всього процесу теплообміну: $t = \text{const}$. Така умова може виконуватись, якщо постійна температура середовища підтримується штучно або підтримується зміна температури середовища згідно з певними закономірностями теплообміну між довкіллям та поверхнею матеріалу або виробу в процесі сушіння, випалу тощо. Тобто у стаціонарному температурному полі $t = f(x)$, коли розподіл температури не залежить від часу.

2. Гранична умова другого роду полягає у заданні щільності теплового потоку на поверхню тіла. Простіший випадок граничної умови другого роду: $q = \text{const}$ – відповідає незмінності щільності теплового потоку. Такий випадок теплообміну властивий нагріванню тіла у високотемпературних печах (скловарних, оберткових, синтезу цементного клінкера), де теплопередача відбувається в основному за законом Стефана – Больцмана, коли температура поверхонь, що випромінюють значно більше температури матеріалів, виробів, скломаси, що нагріваються.

3. Гранична умова третього роду полягає у заданні температури довкілля та закону теплообміну між поверхнею тіла та довкіллям. Зазвичай гранична умова третього роду характеризує конвективний теплообмін між поверхнею тіла та довкіллям у процесах нагріву або охолодження. Такий вид теплообміну спостерігається переважним чином у сушарках ТТНСМ.

Процес конвективного теплообміну є складним, проте для спрощення задачі його приймають у вигляді закону Ньютона, згідно з яким кількість теплоти, яка передається за одиницю часу з одиниці поверхні тіла з температурою $t_{\text{т}}$ у довкілля з температурою $t_{\text{о}}$ під час охолодження

$(t_T > t_o)$, прямо пропорційна різниці температур між поверхнею тіла та довкіллям:

$$q = \alpha \cdot (t_T - t_o). \quad (2.7)$$

У процесі охолодження тіла ця кількість теплоти поверхня повинна віддати у довкілля, а при нагріванні поглинути:

$$q = \alpha \cdot (t_T - t_o) = -\lambda \cdot \left(\frac{\partial t}{\partial n} \right)_n, \quad (2.8)$$

де α – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м²·°C); λ – коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·°C); t_T та t_o – відповідно температура тіла та довкілля, °C; n – нормаль до поверхні тіла.

Коефіцієнт тепловіддачі можна отримати, якщо розв'язати спільне рівняння Ньютона та теплопровідності Фур'є (2.8), або експериментальним шляхом з використанням елементів теорії тотожності.

2.2.1. Розрахунки теплопровідності та теплопередачі у стаціонарному температурному полі $t = f(x)$

Як зазначалось вище, теплопровідність матеріалів у стаціонарному температурному полі може бути розрахована, якщо дотримуватись граничних умов першого та другого роду. Крім того, важливим припущенням є те, що щільність теплового потоку буде лишатись незмінною відносно товщини стінки та часу дії теплового потоку. Тоді тепловий потік, що передається теплопровідністю через багатошарову плоску стінку можна розрахувати за формулою (2.9), Вт:

$$Q = q \cdot F = \frac{(t_{вн} - t_{зов}) \cdot F}{\sum_{i=1}^n \overline{\delta}_i}, \quad (2.9)$$

де q – щільність теплового потоку, Вт/м²; F – площа зовнішньої поверхні стінки, м²; $t_{вн}$, $t_{зов}$ – відповідно температури на внутрішній та зовнішній поверхні стінки, °C; δ_i – товщина i -го шару стінки, м; λ_i – теплопровідність i -го шару стінки, Вт/(м·°C), що розраховується залежно від середньої температури в i -му шарі.

Рівняння (2.9) покладено в основу дуже важливого розрахункового методу підбору теплової ізоляції для окремих ділянок (секцій або зон) теплотехнічних агрегатів ТТНСМ, приклад використання якого наведено нижче.

Приклад розрахунку

Підібрати теплоізоляційні матеріали для багат шарової футерівки секції випалу конвеєрної печі довжиною 3 м, розрахувати температуру зовнішньої поверхні, втрати тепла у навколишнє середовище, а також побудувати криву розподілу температур у стінці, якщо: $t_{\text{вн}} = 1100 \text{ }^\circ\text{C}$, $q_{\text{нс}} = 890 \text{ Вт/м}^2$, ширина й висота робочого каналу печі відповідно – 0,9 та 0,62 м.

На початку з табл. 2.2 обирають теплоізоляційні матеріали для футерівки секції випалу печі у порядку зниження робочих температур:

- 1-й шар: компактна шамотна цегла густиною 1900 кг/м^3 ;
- 2-й шар: легковага шамотна цегла ШЛБ-0,6 густиною 600 кг/м^3 ;
- 3-й шар: пінодіатомітова цегла ПД-400 густиною 400 кг/м^3 .

Таблиця 2.2 – Орієнтовний набір вогнетривких та теплоізоляційних матеріалів

Найменування матеріалу	Густина, кг/м^3	Припустима робоча температура, $^\circ\text{C}$	λ_i , $\text{Вт/(м}\cdot^\circ\text{C)}$	Товщина, мм
Шамот	1900	1350 – 1500	$0,7 + 0,00064 \cdot t$	115
Шамот	1300	1300	$0,61 + 0,00018 \cdot t$	115
Шамот	1200	1300	$0,35 + 0,00035 \cdot t$	200
Шамот	1000	1250	$0,28 + 0,00023 \cdot t$	200
Шамотна легковага	800	1200	$0,21 + 0,00043 \cdot t$	230
Шамотна легковага	600	1200	$0,20 + 0,00036 \cdot t$	230
Шамотна легковага	400	1150	$0,12 + 0,00024 \cdot t$	230
Діатоміт	750	800	$0,17 + 0,00035 \cdot t$	115
Пінодіатоміт	400	800	$0,11 + 0,00023 \cdot t$	115
Шлаковата	300	700	$0,065 + 0,00035 \cdot t$	115

В ході проведення розрахунків необхідно намагатись, щоб розрахункова температура зовнішньої поверхні печі знаходилась у межах: (30–80) $^\circ\text{C}$ для зон підігріву і охолодження; (50–100) $^\circ\text{C}$ для зони випалу.

Оскільки ізоляція складається з i шарів різних матеріалів, то температуру зовнішньої поверхні i -го шару ізоляції розраховують за формулою (2.10), $^\circ\text{C}$:

$$t_{i,\text{зов}} = t_{i,\text{вн}} - q_{\text{нс}} \cdot \frac{\delta_i}{\lambda_i}, \quad (2.10)$$

де $q_{\text{нс}}$ – щільність теплового потоку, що передається в навколишнє середовище, Вт/м²; $t_{i.\text{вн}}$, $t_{i.\text{зов}}$ – відповідно температури на внутрішній та зовнішній поверхні шару ізоляції, °С; δ_i – товщина i -го шару ізоляції, м; λ_i – теплопровідність i -го шару ізоляції, Вт/(м·°С), що розраховується залежно від середньої температури в i -му шарі за рівняннями (див. табл. 2.2).

Розрахунки виконують за методом покрокового наближення, коли задаються очікуваною температурою зовнішньої поверхні i -го шару ізоляції, за допомогою якої розраховують середню температуру шару за формулою (2.11), °С:

$$t_{i.\text{сеп}} = \frac{t_{i.\text{вн}} + t_{i.\text{зов}}}{2}. \quad (2.11)$$

Для одержаної середньої температури розраховують коефіцієнт теплопровідності і потім за формулою (2.10) розраховують температуру зовнішньої поверхні. Кожним наступним кроком розраховують температуру беруть як очікувану і повторюють розрахунки доти, поки очікувана температура зовнішньої поверхні i -го шару ізоляції не зрівняється з розрахунковою.

Визначена зовнішня температура i -го шару ізоляції буде дорівнювати внутрішній температурі $(i+1)$ -го шару. Результати розрахунків приводять у вигляді табл. 2.3.

Наприклад, у секції випалу щільність теплового потоку становить 890 Вт/м², тоді для очікуваної зовнішньої температури першого шару шамоту (можна припустити будь-яку реальну температуру) 1 021 °С за формулою (2.11) одержують середню температуру: $t_{1.\text{сеп}} = (1021+1100)/2 = 1061$ °С; потім розраховують середній коефіцієнт теплопровідності шару шамоту: $\lambda_1 = 0,7+0,00064 \cdot 1061 = 1,379$ Вт/(м·°С), і нарешті, за формулою (2.10) температуру зовнішньої поверхні шару шамоту:

$$t_{i.\text{зов}} = 1100 - 890 \cdot \frac{0,115}{1,379} = 1\,026 \text{ °С}.$$

Наступним кроком припускають очікувану зовнішню температуру першого шару 1 026 °С і повторюють розрахунки доти, поки очікувана температура не дорівнюватиме розрахунковій.

Після цього проводять розрахунки другого шару (у даному прикладі шару шамотної легковаги ШЛБ – 600) маючи на увазі, що для другого шару температурою внутрішньої поверхні буде розрахована для першого шару температура зовнішньої поверхні, тобто: $t_{1.\text{зов}} = t_{2.\text{вн}} = 1026$ °С.

Щільність теплового потоку при цьому залишиться незмінною. Аналогічним чином розраховують третій шар ізоляції (див. табл. 2.3).

Таблиця 2.3 – Розрахунки температури зовнішньої поверхні печі (секція випалу)

Очікувана температура, $t_{\text{зов.оч}}, ^\circ\text{C}$	Середня температура, $t_{\text{сер}}, ^\circ\text{C}$	Коефіцієнт теплопровідності, $\lambda, \text{Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$	Розрахункова температура, $t_{\text{зов.розр}}, ^\circ\text{C}$	Характеристика шару				
1	2	3	4	5				
$q_{\text{НС}} = 890 \text{ Вт}/\text{м}^2$				1-й шар: Ш-1,9, $\delta_1 = 0,115 \text{ м},$ $t_{1.\text{вн}} = 1100 ^\circ\text{C},$ $t_{1.\text{зов}} = 1026 ^\circ\text{C},$ $\lambda_1 = 0,7 + 0,00064 \cdot t$ $\text{Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$				
1021	1061	1,379	1026					
1026	1063	1,380	1026					
				2-й шар: ШЛБ-600, $\delta_2 = 0,23 \text{ м},$ $t_{2.\text{вн}} = 1026 ^\circ\text{C},$ $t_{2.\text{зов}} = 612 ^\circ\text{C},$ $\lambda_2 = 0,2 + 0,00036 \cdot t$ $\text{Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$				
					600	813	0,493	611
					611	819	0,495	612
				3-й шар: ПД-400, $\delta_3 = 0,115 \text{ м},$ $t_{3.\text{вн}} = 612 ^\circ\text{C},$ $t_{3.\text{зов}} = 68 ^\circ\text{C},$ $\lambda_3 = 0,11 + 0,00023 \cdot t$ $\text{Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$				
					612	819	0,495	612
50	331	0,186	62					
62	337	0,188	66					
66	339	0,188	67					
67	340	0,188	68					
68	340	0,188	68					

Отже, за щільності теплового потоку $890 \text{ Вт}/\text{м}^2$ одержана температура зовнішньої поверхні $68 ^\circ\text{C}$ знаходиться у межах $(50\text{--}100) ^\circ\text{C}$, тому розрахунок вважається виконаний правильно.

Розрахунки видатків тепла в навколишнє середовище для цієї секції проводять за допомогою формули (2.9), кДж/год:

$$Q_{\text{НС}} = \frac{3,6 \cdot (t_{\text{вн}} - t_{\text{зов}}) \cdot F_{\text{П}}}{n \cdot \sum_{i=1}^3 \left(\frac{1}{\lambda_i} \right)} = 3,6 \cdot q_{\text{НС}} \cdot F_{\text{П}},$$

де $F_{\text{П}}$ – площа зовнішньої поверхні секції печі, яка розраховується за формулою (2.12), м^2 :

$$F_{\text{П}} = 2 \cdot L_{\text{П}} \cdot (K_{\text{П}} + H_{\text{П}}), \quad (2.12)$$

де $L_{\text{п}}$, $K_{\text{п}}$, $H_{\text{п}}$ – відповідно довжина, ширина і висота зовнішньої поверхні секції, м.

Побудування розподілу температур у тришаровій стінці має вигляд рис. 2.1.

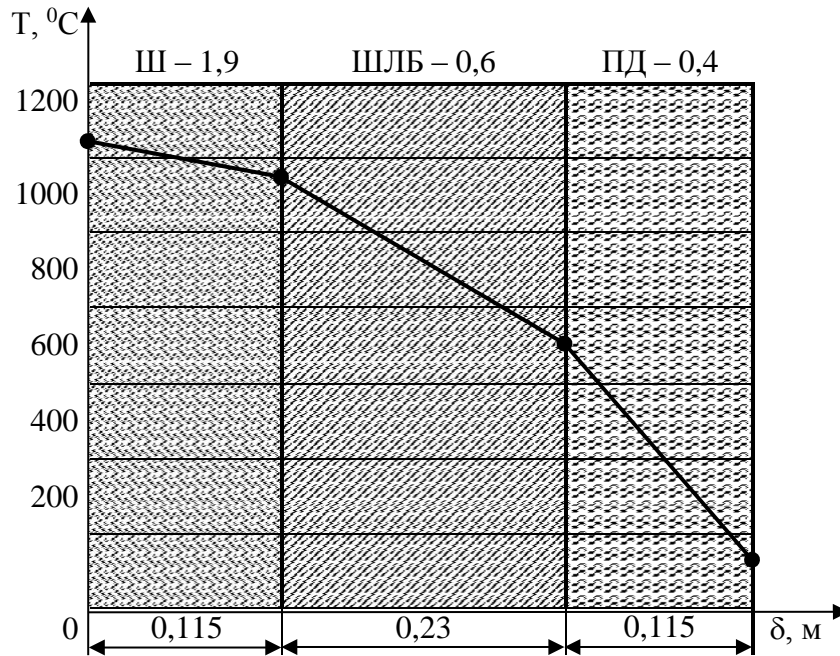


Рис. 2.1. Розподіл температур у багат шаровій стінці, складеної з різномірних матеріалів

Для обраної печі ширина пічного каналу дорівнює 0,9 м, висота пічного каналу 0,62 м, тому ширина та висота зовнішньої поверхні секції визначаються з урахуванням товщини теплової ізоляції таким чином:

$$K_{\text{п}} = 2 \cdot (0,115 + 0,23 + 0,115) + 0,9 = 1,82 \text{ м.}$$

$$H_{\text{п}} = 2 \cdot (0,115 + 0,23 + 0,115) + 0,62 = 1,54 \text{ м.}$$

Враховуючи відому довжину секції $L_{\text{п}} = 3$ м, площу зовнішньої поверхні секції випалу розраховують за формулою (2.12):

$$L_{\text{п}} = 2 \cdot 3 \cdot (1,82 + 1,54) = 20,16 \text{ м}^2.$$

Тоді видатки тепла в навколишнє середовище секцією випалу будуть становити за формулою (2.9):

$$Q_{\text{нс}} = 3,6 \cdot 890 \cdot 20,16 = 64\,593 \text{ кДж/год.}$$

Задачі для практики

Користуючись таблицею 2.2, підберіть теплоізоляційні матеріали для футерівки секції печі, розрахуйте температуру зовнішньої поверхні, втрати тепла в навколишнє середовище, а також побудуйте криву розподілу температур у стінці, якщо:

1. Довжина секції 2,5 м, температура внутрішньої поверхні 1080 °С, щільність теплового потоку 900 Вт/м², ширина та висота робочого каналу печі відповідно – 0,9 та 0,62 м.

2. Довжина секції 2,6 м, температура внутрішньої поверхні 900 °С, щільність теплового потоку 480 Вт/м², ширина та висота робочого каналу печі відповідно – 1,3 та 0,75 м.

3. Довжина секції 2,7 м, температура внутрішньої поверхні 1020 °С, щільність теплового потоку 780 Вт/м², ширина та висота робочого каналу печі відповідно – 1,15 та 0,73 м.

4. Довжина секції 2,8 м, температура внутрішньої поверхні 1120 °С, щільність теплового потоку 950 Вт/м², ширина та висота робочого каналу печі відповідно – 1,1 та 0,65 м.

5. Довжина секції 2,9 м, температура внутрішньої поверхні 980 °С, щільність теплового потоку 580 Вт/м², ширина та висота робочого каналу печі відповідно – 0,86 та 0,42 м.

6. Довжина секції 2,95 м, температура внутрішньої поверхні 900 °С, щільність теплового потоку 520 Вт/м², ширина та висота робочого каналу печі відповідно – 0,9 та 0,47 м.

7. Довжина секції 3,1 м, температура внутрішньої поверхні 1050 °С, щільність теплового потоку 790 Вт/м², ширина та висота робочого каналу печі відповідно – 1,2 та 0,72 м.

8. Довжина секції 3,2 м, температура внутрішньої поверхні 700 °С, щільність теплового потоку 390 Вт/м², ширина та висота робочого каналу печі відповідно – 0,9 та 0,48 м.

9. Довжина секції 3,3 м, температура внутрішньої поверхні 800 °С, щільність теплового потоку 450 Вт/м², ширина та висота робочого каналу печі відповідно – 1,1 та 0,7 м.

10. Довжина секції 3,4 м, температура внутрішньої поверхні 900 °С, щільність теплового потоку 470 Вт/м², ширина та висота робочого каналу печі відповідно – 0,86 та 0,5 м.

11. Довжина секції 3,5 м, температура внутрішньої поверхні 550 °С, щільність теплового потоку 350 Вт/м², ширина та висота робочого каналу печі відповідно – 0,91 та 0,6 м.

12. Довжина секції 2,75 м, температура внутрішньої поверхні печі 650 °С, щільність теплового потоку 360 Вт/м², ширина та висота робочого каналу печі відповідно – 1,0 та 0,63 м.

13. Довжина секції 2,85 м, температура внутрішньої поверхні печі 1100 °С, щільність теплового потоку 830 Вт/м², ширина та висота робочого каналу печі відповідно – 0,86 та 0,5 м.

14. Довжина секції 3,15 м, температура внутрішньої поверхні печі 1120 °С, щільність теплового потоку 910 Вт/м², ширина та висота робочого каналу печі відповідно – 1,3 та 0,75 м.

15. Довжина секції 3,25 м, температура внутрішньої поверхні печі 890 °С, щільність теплового потоку 490 Вт/м², ширина та висота робочого каналу печі відповідно – 0,9 та 0,485 м.

16. Довжина секції 2,65 м, температура внутрішньої поверхні печі 770 °С, щільність теплового потоку 370 Вт/м², ширина та висота робочого каналу печі відповідно – 0,9 та 0,62 м.

2.2.2. Розрахунки теплопровідності та теплопередачі у нестационарному температурному полі $t = f(x, \tau)$

У ТТНСМ нестационарна теплопровідність та теплопередача мають місце, коли матеріал нагрівають або охолоджують, прогрівують або охолоджують технологічне обладнання у процесі його запуску, зупинки або зміни технологічного режиму процесу. Під час розігріву печей їх стінки акумулюють тепло, при цьому їх тепловміст змінюється пропорційно зміні температури. Кількість теплоти, що виділяється в одиниці об'єму за одиницю часу, може бути прийнятною постійною, але розподіленою у часі.

Розрахунки зміни температур під час прогріву стінки (плити, пластини) зручніше за все проводити користуючись методом кінцевих різниць. За допомогою цього методу може бути розв'язана практично будь-яка задача нестационарної теплопровідності та теплопередачі за будь-яких довільно взятих початкових та граничних умовах, а також з урахуванням змінних фізичних параметрів тіла.

Суть методу полягає у заміні диференціалів у рівнянні теплопровідності їх скінченнорізницеvim аналогом. При цьому тіло складається з декількох шарів, а безперервний розподіл температур у тілі змінюється на ступеневий або дискретний. За умови одномірного нестационарного температурного поля для стінки у формі пластини (плити), рівняння переносу теплоти може бути записаним у вигляді класичного рівняння теплопровідності Фур'є:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \cdot \frac{\partial^2 t}{\partial s^2}.$$

Останнє рівняння у кінцевих різницях може бути записано у такому вигляді:

$$\frac{\Delta t}{\Delta \tau} = a \cdot \frac{\Delta^2 t}{\Delta s^2}, \quad (2.13)$$

де Δt – прирощення температури у шарі завтовшки Δs ; $\Delta \tau$ – прирощення часу; a – коефіцієнт теплопровідності, який характеризує швидкість вирівнювання температури шару (матеріалу) у нестационарних умовах і може бути розрахований за формулою (2.14), м²/год:

$$a = \frac{3,6 \cdot \lambda}{\rho \cdot c}, \quad (2.14)$$

де λ – коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·°С); ρ – густина, кг/м³; c – масова теплоємність, кДж/(кг·°С).

Стінка має бути розбита на певну кількість шарів однакової товщини Δs_n , які розрізнятимуться за індексами $n - 1, n, n + 1$ (тобто, попередній до того, що розглядається; той, що розглядається; наступний до нього) і т. д. Температурна крива у тілі являє собою ламану лінію згідно з рис. 2.2, а час вимірюється інтервалами $\Delta \tau_k$, які також позначені індексами $k, k + 1, k + 2$ і т. д. Тоді $t_{n,k}$ – температура n -го шару впродовж k -го проміжку часу; $t_{n-1,k}$ – температура у попередньому шарі; $t_{n+1,k}$ – температура у наступному шарі впродовж k -го проміжку часу; $t_{n,k+1}$ – температура n -го шару впродовж наступного проміжку часу.

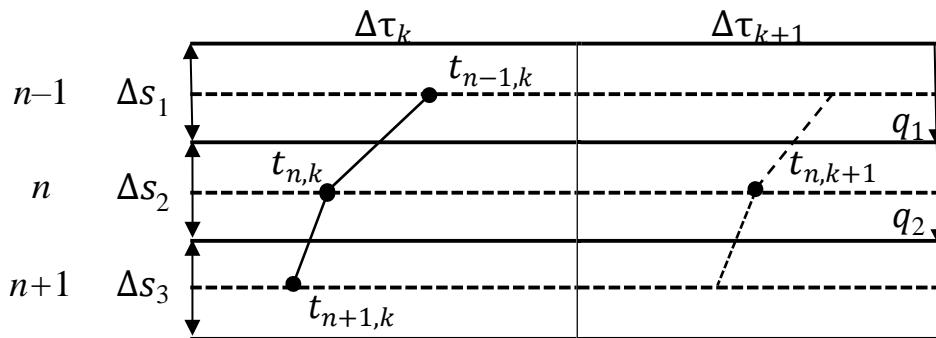


Рис. 2.2. Схема розподілу температур у шарах (для розв'язання задачі методом кінцевих різниць)

Як видно з рис. 2.2, у шарі n перетинаються два відрізка температурної кривої з різними нахилами.

Звідси можна отримати значення відношення елементарної різниці (градієнта) температур між шарами $n+1$ та n :

$$\frac{\Delta t}{\Delta s} = \frac{t_{n+1,k} - t_{n,k}}{\Delta s},$$

а також між шарами n та $n-1$:

$$\frac{\Delta t}{\Delta s} = \frac{t_{n,k} - t_{n-1,k}}{\Delta s}.$$

Тоді відповідне прирощення другого порядку становитиме:

$$\frac{\Delta^2 t}{\Delta s^2} = \frac{t_{n+1,k} + t_{n-1,k} - 2 \cdot t_{n,k}}{\Delta s^2}.$$

Відношення елементарних різниць температури і часу для шару n :

$$\frac{\Delta t}{\Delta \tau} = \frac{t_{n,k+1} - t_{n,k}}{\Delta \tau}.$$

Рівняння теплопровідності у кінцевих різницях (2.13) матиме такий вигляд:

$$\frac{t_{n,k+1} - t_{n,k}}{\Delta \tau} = a \cdot \frac{t_{n+1,k} + t_{n-1,k} - 2 \cdot t_{n,k}}{\Delta s^2},$$

або

$$t_{n,k+1} - t_{n,k} = a \cdot \frac{\Delta \tau}{\Delta s^2} 2 \cdot \left(\frac{t_{n+1,k} + t_{n-1,k}}{2} - t_{n,k} \right). \quad (2.15)$$

Метою розв'язання рівняння (2.15) є пошук температури – $t_{n,k+1}$ тобто, користуючись відомими Δs та $\Delta \tau$, а також температурами у шарі n за попередній проміжок часу, необхідно знайти температуру в цьому ж шарі у наступний проміжок часу.

Найбільш простий вигляд рівняння (2.15) буде мати коли у матеріалі, що нагрівається, виникає ендотермічний ефект. У цьому випадку теплота, що підводиться в зону хімічних перетворень, поглинається без підвищення температури цього шару. Тоді вираз перед дужками можна прирівняти до одиниці та отримати рівняння для визначення $\Delta \tau$:

$$\Delta\tau = \frac{\Delta s^2}{2 \cdot a}. \quad (2.16)$$

Враховуючи це шукана температура може бути розрахована як середнє арифметичне значення температур сусідніх шарів (у цьому випадку $n-1$ та $n+1$) за попередній проміжок часу за формулою (2.17), °C:

$$t_{n,k+1} = \left(\frac{t_{n+1,k} + t_{n-1,k}}{2} \right). \quad (2.17)$$

Температура зовнішньої поверхні стінки, яка межує з навколишнім середовищем, у початковий період нагріву залишається незмінною, але з часом в процесі тривання нагріву почне підвищуватись. З цього моменту температура зовнішньої поверхні стінки має визначатись виходячи з теплового балансу між кількістю теплоти, яке передається на зовнішню поверхню теплопровідністю, та відводиться у навколишнє середовище тепловіддачею:

$$q = \frac{\lambda \cdot (t_{\Delta s} - t_{\text{зов}})}{\Delta s} = \alpha \cdot (t_{\text{зов}} - t_{\text{нс}}).$$

Звідси шукана температура зовнішньої поверхні становитиме, °C:

$$t_{\text{зов}} = \frac{\alpha \cdot \Delta s \cdot t_{\text{нс}} + \lambda \cdot t_{\Delta s}}{\lambda + \alpha \cdot \Delta s}, \quad (2.18)$$

де α – коефіцієнт тепловіддачі від зовнішньої поверхні стінки у навколишнє середовище, Вт/(м²·°C); λ – коефіцієнт теплопровідності стінки, Вт/(м·°C); $t_{\text{нс}}$ – температура навколишнього середовища, °C; $t_{\Delta s}$ – температура шару віддаленого на глибину Δs від зовнішній поверхні у цей проміжок часу, °C.

Якщо стінка складається з різномірних матеріалів з відмінними коефіцієнтами λ та a , наприклад з вогнетривкої кладки та теплоізоляції, перший однорідний шар (основний) розбивається подібно однорідній стінці на ряд елементарних шарів завтовшки Δs . Загальний час процесу також поділяється на ряд рівних проміжків часу, тривалість яких визначається за формулою (2.15).

Другий (наступний) шар розбивається на рівні частини завтовшки $\Delta s'$ за дотримання умови тотожності проміжків часу $\Delta\tau = \Delta\tau'$. За цих умов для багат шарової стінки має бути справедливою рівність:

$$\Delta\tau = \frac{\Delta s^2}{2 \cdot a} = \frac{(\Delta s')^2}{2 \cdot a'} = \frac{(\Delta s'')^2}{2 \cdot a''} = \dots = \text{const.}$$

З цієї рівності виходить, що товщина другого шару має бути розрахована за формулою (2.19), м:

$$\Delta s' = \Delta s \cdot \sqrt{\frac{a'}{a}}. \quad (2.19)$$

Температура у площині зіткнення різнорідних шарів розраховується подібно до температур в елементарних шарах однорідного матеріалу як середня арифметична температура доти, поки не почне підвищуватись. Починаючи з цього проміжку часу, вона визначається виходячи з умови, що кількість теплоти, що підводиться до поверхні розділу, дорівнює кількості тепла, що відводиться від неї.

За відомих температур поверхонь віддалених від площини зіткнення по обидві боки на глибину Δs та $\Delta s'$, шукана температура у площині зіткнення шарів знаходиться за формулою (2.20), °C:

$$t_3 = \frac{r' \cdot t_{\Delta s} + r \cdot t_{\Delta s'}}{r + r'}, \quad (2.20)$$

де r та r' – теплові опори шарів Δs та $\Delta s'$, які визначаються за формулами, (м²·°C)/Вт: $r = \Delta s / \lambda$ та $r' = \Delta s' / \lambda'$; $t_{\Delta s}$, $t_{\Delta s'}$ – відповідно температури шарів віддалених на глибину Δs та $\Delta s'$ від площини зіткнення у цей проміжок часу, °C.

У подальшому температури визначаються таким же чином, як для однорідної стінки (шару).

Приклад розрахунку

Тривалість підвищення температур, витримки та охолодження складає 22 год згідно з рис. 2.3. Стінка складається з двох шарів: шамотного густиною 1 900 кг/м³ завтовшки 345 мм та теплоізоляційного (з трепельної цегли) густиною 700 кг/м³ завтовшки 115 мм. Початкова температура стінки по всій товщині 20 °C. Температура навколишнього повітря 20 °C. Визначити розподіл температур при розігріві пічної стінки за графіком.

Розв'язання задачі виконують за допомогою методу кінцевих різниць, згідно з яким шамотний (основний) шар стінки розбивають на шість (будь-яке довільне число) рівних частин:

$$\Delta s = \frac{0,345}{6} = 0,058 \text{ м.}$$

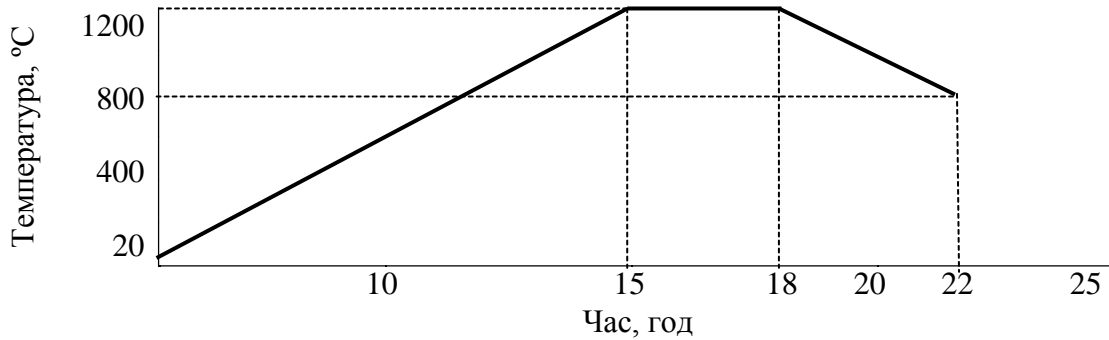


Рис. 2.3. Графік нагріву двошарової стінки

Розрахункові проміжки часу мають бути визначені за формулою (2.16), яка містить коефіцієнт температуропровідності, який, у свою чергу, визначається за формулою (2.14). Для визначення коефіцієнта температуропровідності шамоту необхідно попередньо розрахувати коефіцієнти теплопровідності та теплоємності, які залежать від температури стінок, а останні є шуканими величинами. Саме тому значення λ та c треба визначати враховуючи температурний режим нагріву. Середні температури за масою стінки легко визначити для стаціонарного теплового стану стінки, це будуть максимально можливі температури. Середні розрахункові температури залежать від тривалості нагріву та можуть бути прийняті тільки орієнтовно.

За допомогою графіка нагріву задаються орієнтовною середньою температурою шамотного шару 600 °C. Для цієї температури за рівняннями температурної залежності λ та c шамоту густиною 1900 кг/м³, які наведені у табл. 2.5, розраховують значення відповідних коефіцієнтів: $\lambda = 1,08$ Вт/(м·°C); $c = 0,997$ кДж/(кг·°C). Тоді значення коефіцієнта температуропровідності шамоту становитиме (за формулою 2.14):

$$a = \frac{3,6 \cdot 1,08}{1900 \cdot 0,997} = 0,00205 \text{ м}^2/\text{год.}$$

А відповідне значення елементарного проміжку часу (за формулою 2.16):

$$\Delta \tau = \frac{(0,058)^2}{2 \cdot 0,00205} = 0,815 \text{ год.}$$

Ізоляційний шар має бути поділений на частини за формулою 2.19. Для визначення коефіцієнта температуропровідності ізоляційного шару також задаються середньою температурою 100 °С. Для цієї температури подібно шамотному шару розраховують значення коефіцієнтів теплопровідності та теплоємності: $\lambda' = 0,17$ Вт/(м·°С); $c' = 0,89$ кДж/(кг·°С). Тоді коефіцієнт температуропровідності ізоляційного шару становитиме (за формулою 2.14):

$$a' = \frac{3,6 \cdot 0,17}{700 \cdot 0,89} = 0,00098 \text{ м}^2/\text{год.}$$

Відповідно товщина ізоляційного шару становитиме (за формулою 2.19):

$$\Delta s' = 0,058 \cdot \sqrt{\frac{0,00098}{0,00205}} = 0,04 \text{ м.}$$

Кількість частин ізоляційного шару:

$$n = \frac{0,115}{0,04} \approx 3.$$

Далі складають таблицю, на кшталт табл. 2.4, до якої заносять розраховані температури.

З початку визначають зміну температур на внутрішній поверхні стінки за графіком (див. рис. 2.2). Швидкість підвищення температур від 20 до 1200 °С становить:

$$\frac{1200 - 20}{15} = 78,5 \text{ °С/год.}$$

Аналогічним чином швидкість охолодження становить 100 °С/год.

За кожен проміжок часу $\Delta\tau = 0,815$ год підвищення температури внутрішньої поверхні стінки становить:

$$\Delta t_{\text{вн.пов}} = 0,815 \cdot 78,5 = 64 \text{ °С.}$$

Температури шарів стіни будуть відповідно: $20 + 64 = 84$ °С; $84 + 64 = 148$ °С; $148 + 64 = 212$ °С і т. д. Ці температури вносять до табл. 2.4.

За 15 год нагріву температура внутрішньої поверхні становитиме 1200 °С. Після 18 год нагріву починається зниження температури. Для

проміжку часу $23\Delta\tau = 18,745$ год температура внутрішньої поверхні буде дорівнювати: $1200 - 0,745 \cdot 100 = 1126$ °С. Далі температура буде знижуватись на величину: $0,815 \cdot 100 = 81,5$ °С.

Температури в окремих шарах $1\Delta s$, $2\Delta s$ і так далі, розраховуються для кожного нового проміжку часу $\Delta\tau$, як середні арифметичні значення температур сусідніх шарів за попередній проміжок часу, а отже:

$$t_{1\Delta\tau, 1\Delta s} = \frac{t_{0\Delta\tau, 0\Delta s} + t_{0\Delta\tau, 2\Delta s}}{2} = \frac{20+20}{2} = 20 \text{ °С};$$

$$t_{1\Delta\tau, 2\Delta s} = \frac{t_{0\Delta\tau, 1\Delta s} + t_{0\Delta\tau, 3\Delta s}}{2} = \frac{20+20}{2} = 20 \text{ °С};$$

$$t_{2\Delta\tau, 1\Delta s} = \frac{t_{1\Delta\tau, 0\Delta s} + t_{1\Delta\tau, 2\Delta s}}{2} = \frac{84+20}{2} = 52 \text{ °С};$$

$$t_{3\Delta\tau, 1\Delta s} = \frac{148+20}{2} = 84 \text{ °С}; \quad t_{3\Delta\tau, 2\Delta s} = \frac{52+20}{2} = 36 \text{ °С}; \text{ і т.д.}$$

Як було зазначено вище, температура на поверхні зіткнення шарів шамоту та ізоляції у початковий період нагріву розраховується як середня арифметична температура. Але якщо розрахувати температуру для проміжку часу $7\Delta\tau$ та шару $6\Delta s$ як середню арифметичну, то можна побачити, що отримане значення температури (21 °С) буде відрізнятись від попередніх (20 °С). Це свідчить про те, що температура на поверхні зіткнення шарів шамоту та ізоляції почала підвищуватись і надалі має бути розрахована за рівнянням (2.20). Для цього попередньо визначають теплові опори шарів Δs та $\Delta s'$, ($\text{м}^2 \cdot \text{°С}$)/Вт:

$$r = \frac{\Delta s}{\lambda} = \frac{0,058}{1,08} = 0,0536; \quad r' = \frac{\Delta s'}{\lambda'} = \frac{0,04}{0,17} = 0,235.$$

Після чого отримані значення r та r' разом з температурами $t_{\Delta s}$ та $t_{\Delta s'}$, які беруть з табл. 2.4, підставляють у рівняння (2.19) і розраховують температуру на поверхні зіткнення шарів, тобто, для проміжку часу $7\Delta\tau$ та шару $6\Delta s$:

$$t_3 = t_{7\Delta\tau, 6\Delta s} = \frac{0,235 \cdot 24 + 0,0536 \cdot 20}{0,0536 + 0,235} = 23 \text{ °С}.$$

Після цього кожне нове значення температури на поверхні зіткнення шарів шамоту та ізоляції для наступного проміжку часу розраховується за формулою (2.19) (виокремлена іншим кольором ділянка табл. 2.4 для шару $6\Delta s$).

Далі визначають температури у сусідніх до поверхні зіткнення шарів впродовж наступного проміжку часу:

$$t_{8\Delta\tau, 5\Delta s} = \frac{36+23}{2} = 30 \text{ }^\circ\text{C}; \quad t_{8\Delta\tau, 1\Delta s'} = \frac{23+20}{2} = 22 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Також продовжують визначати температури на поверхні зіткнення шарів для кожного наступного проміжку часу:

$$t_{8\Delta\tau, 6\Delta s} = \frac{0,235 \cdot 30 + 0,0536 \cdot 22}{0,0536 + 0,235} = 28,5 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$t_{9\Delta\tau, 6\Delta s} = \frac{0,235 \cdot 37 + 0,0536 \cdot 25}{0,0536 + 0,235} = 35 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$t_{10\Delta\tau, 6\Delta s} = \frac{0,235 \cdot 46 + 0,0536 \cdot 28}{0,0536 + 0,235} = 42,6 \text{ }^\circ\text{C і т. д.}$$

Температура зовнішньої поверхні стінки у початковий період нагріву також розраховується як середня арифметична температура доти, поки не почне підвищуватись (початок підвищення, як і для температури поверхні зіткнення шарів, визначається розрахунковим способом). Після підвищення шукана температура має бути розрахована за формулою (2.18).

Враховуючи, що стінка не прогріта до стаціонарного стану, значення коефіцієнта тепловіддачі від зовнішньої поверхні стінки у навколишнє середовище α беруть $8 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$, після чого за формулою (2.18) розраховують температуру зовнішньої поверхні:

$$t_{\text{зов}} = t_{10\Delta\tau, 3\Delta s'} = \frac{\alpha \cdot \Delta s' \cdot t_{\text{нц}} + \lambda' \cdot t_{\Delta s'}}{\lambda' + \alpha \cdot \Delta s'} = \frac{8 \cdot 0,04 \cdot 20 + 0,17 \cdot 23}{0,17 + 8 \cdot 0,04} = 21 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Кожне нове значення температури зовнішньої поверхні для наступного проміжку часу розраховують за формулою (2.18) (виокремлена іншим кольором ділянка табл. 2.4 для шару $3\Delta s'$):

$$t_{11\Delta\tau, 3\Delta s'} = \frac{8 \cdot 0,04 \cdot 20 + 0,17 \cdot 25}{0,17 + 8 \cdot 0,04} = 22 \text{ }^\circ\text{C і т. д.}$$

Таблиця 2.4 – Розрахунок розподілу температур у двошаровій стінці

Відстань від стінки, що зігрівається, м		Температура через проміжки часу $\Delta\tau = 0,815$ год														
		0 $\Delta\tau$ 0,00	1 $\Delta\tau$ 0,815	2 $\Delta\tau$ 1,63	3 $\Delta\tau$ 2,445	4 $\Delta\tau$ 3,26	5 $\Delta\tau$ 4,075	6 $\Delta\tau$ 4,89	7 $\Delta\tau$ 5,705	8 $\Delta\tau$ 6,52	9 $\Delta\tau$ 7,335	10 $\Delta\tau$ 8,15	11 $\Delta\tau$ 8,965	12 $\Delta\tau$ 9,78	13 $\Delta\tau$ 10,595	14 $\Delta\tau$ 11,41
Внутрішня поверхня	0 Δs 0,000	20	84	148	212	276	340	404	468	532	596	660	724	788	852	916
Шари шамоту	1 Δs 0,058	20	20	52	84	124	164	208	252	299	345	394	442	488	541	591
	2 Δs 0,116	20	20	20	36	52	76	100	129	158	191	223	259	294	330	367
	3 Δs 0,174	20	20	20	20	28	36	50	64	83	101	124	146	172	192	226
	4 Δs 0,232	20	20	20	20	20	24	28	36	44	57	69	85	101	112	137
	5 Δs 0,290	20	20	20	20	20	20	22	24	30	37	46	56	69	82	98
Поверхня розділу	6 Δs 0,348	20	20	20	20	20	20	20	23	29	35	43	52	64	75	90
Шари ізоляції	1 $\Delta s'$ 0,388	20	20	20	20	20	20	20	20	22	25	28	33	39	46	53
	2 $\Delta s'$ 0,428	20	20	20	20	20	20	20	20	20	21	23	25	28	31	35
Зовнішня поверхня	3 $\Delta s'$ 0,468	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	21	22	23	24	25

Продовження таблиці 2.4

Відстань від стінки, що зігрівається, м		Температура через проміжки часу $\Delta\tau = 0,815$ год												
		15 $\Delta\tau$ 12,225	16 $\Delta\tau$ 13,04	17 $\Delta\tau$ 13,855	18 $\Delta\tau$ 14,67	19 $\Delta\tau$ 15,485	20 $\Delta\tau$ 16,30	21 $\Delta\tau$ 17,115	22 $\Delta\tau$ 17,93	23 $\Delta\tau$ 18,745	24 $\Delta\tau$ 19,56	25 $\Delta\tau$ 20,375	26 $\Delta\tau$ 21,19	27 $\Delta\tau$ 22,005
Внутрішня поверхня	0 Δs 0,000	980	1044	1108	1172	1200	1200	1200	1200	1126	1044	963	881	800
Шари шамоту	1 Δs 0,058	642	695	746	800	852	888	990	927	941	917	887	817	805
	2 Δs 0,116	409	447	491	531	576	618	654	682	708	729	731	729	717
	3 Δs 0,174	252	286	315	351	383	420	454	488	517	545	570	587	598
	4 Δs 0,232	162	183	210	234	263	290	321	351	381	410	442	466	488
	5 Δs 0,290	114	133	153	175	197	222	427	274	302	339	361	388	412
Поверхня розділу	6 Δs 0,348	104	122	140	160	180	203	227	252	296	311	333	358	380
Шари ізоляції	1 $\Delta s'$ 0,388	63	72	83	96	109	123	138	154	170	197	209	228	244
	2 $\Delta s'$ 0,428	39	45	51	57	65	73	80	88	97	107	122	130	140
Зовнішня поверхня	3 $\Delta s'$ 0,468	27	29	31	33	36	36	38	40	43	46	50	53	56

Після початку періоду витримки необхідно перевірити значення α беручи до уваги, що стінка зазнає дії процесу складного теплообміну.

Для перевірки значення коефіцієнта тепловіддачі від зовнішньої поверхні стінки у навколишнє середовище користуються емпіричною формулою (2.21), Вт/м²·°C:

$$\alpha = 2,6 \cdot \sqrt[4]{t_{\text{зов}} - t_{\text{нс}}} + \frac{5,7}{t_{\text{зов}} - t_{\text{нс}}} \cdot \varepsilon_{\text{м}} \cdot \left[\left(\frac{T_{\text{зов}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{нс}}}{100} \right)^4 \right]. \quad (2.21)$$

За її допомоги та за відомого ступеня чорноти ізоляції $\varepsilon_{\text{м}} = 0,8$, для проміжку часу $20\Delta t$ та шару $3\Delta s'$, отримують:

$$\alpha = 2,6 \cdot \sqrt[4]{36 - 20} + \frac{5,7 \cdot 0,8 \cdot \left[\left(\frac{309}{100} \right)^4 - \left(\frac{239}{100} \right)^4 \right]}{36 - 20} = 10,1 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{°C}.$$

Тоді шукану температуру зовнішньої поверхні стінки розраховують за допомогою отриманого значення α :

$$t_{20\Delta t, 3\Delta s'} = \frac{10,1 \cdot 0,04 \cdot 20 + 0,17 \cdot 73}{0,17 + 10,1 \cdot 0,04} = 36 \text{ °C}.$$

Наступні температури зовнішньої поверхні розраховують при $\alpha = 10,1$ Вт/м²·°C та заносять до табл. 2.4.

Використовуючи табл. 2.4, знаходять середнє арифметичне значення температур за масою шару шамоту та шару теплоізоляції в кінці періоду нагріву, витримки та охолодження.

Для цих середніх температур потрібно було б обрати значення коефіцієнтів λ та c на початку розрахунку. У цьому прикладі λ та c для шамоту були прийняті орієнтовно дещо збільшеними, тому для більш чіткого розрахунку потрібно визначити нові значення λ та c і повторити виконання розрахунку температур.

Найбільш коректні визначення температур потребують починати розрахунок при теплофізичних константах матеріалів, що визначені для початкової температури стінки. Потім через певні проміжки часу визначати середні температури за масою шарів для уточнення коефіцієнтів λ та c і вносити відповідні поправки у розрахунок, кожен раз змінюючи значення Δt .

Таблиця 2.5 – Теплопровідність та теплоємність вогнетривких та теплоізоляційних матеріалів

Матеріал	Густина, кг/м ³	λ , Вт/(м·°С)	c , кДж/(кг·°С)
Шамот	1900	$0,70+0,00064 \cdot t$	$0,837+0,000264 \cdot t$
Шамот	1300	$0,61+0,00018 \cdot t$	
Шамот	1200	$0,35+0,00035 \cdot t$	
Шамот	1000	$0,28+0,00023 \cdot t$	
Шамот	800	$0,21+0,00043 \cdot t$	
Динас	1900	$1,07+0,00093 \cdot t$	$0,795+0,000335 \cdot t$
Динас	1100	$0,58+0,00043 \cdot t$	
Напівкисла цегла	1800	$0,85+0,00040 \cdot t$	$0,88+0,00023 \cdot t$
Глиняна цегла	1800	$0,47+0,00051 \cdot t$	$0,837+0,000264 \cdot t$
Високоглиноземні	2500	$2,1-0,00062 \cdot t$	$0,837+0,000264 \cdot t$
Високоглиноземні	1330	$0,66+0,00008 \cdot t$	
Корунд	2600–2900	$2,1+0,00215 \cdot t$	$0,419+0,00088 \cdot t$
Силіманіт	1650	$1,66-0,0018 \cdot t$	$0,67+0,000167 \cdot t$
Мулітові	2200–2900	$2,96-0,00110 \cdot t$	$0,67+0,000126 \cdot t$
Магнетитові	2600–2700	$6,2-0,00270 \cdot t$	$0,942+0,00025 \cdot t$
Хромомагнетит	2900	$2,0-0,00035 \cdot t$	$0,754+0,00015 \cdot t$
Форстерит	3000	$3,3-0,00110 \cdot t$	$0,89+0,000419 \cdot t$
Периклазошпинельні	3000	$2,5-0,00058 \cdot t$	$0,775+0,0003 \cdot t$
Карборунд	2000–2500	$5,2-0,00130 \cdot t$	$0,96+0,000146 \cdot t$
Діатоміт	1100	$0,27+0,00023 \cdot t$	$0,837-0,92$
Діатоміт	750	$0,17+0,00035 \cdot t$	
Шлаковата	300	$0,065+0,00035 \cdot t$	$0,88$

Задачі для практики

1. Визначте температуру на поверхні розділу шарів після 5 год нагріву, якщо відомо, що піч, яку викладено з корунду густиною 2 800 кг/м³ (товщина шару 0,20 м) та шамоту густиною 800 кг/м³ (товщина шару 0,14 м; ступінь чорноти 0,79), розігрівали від 20 °С до 900 °С зі швидкістю 100 °С/год. Температура навколишнього повітря – 20 °С. Коефіцієнти теплопровідності та теплоємності розрахуйте скориставшись табл. 2.5.

2. Визначте температуру на поверхні розділу шарів після 7 год нагріву, якщо відомо, що піч, яку викладено з хромомагнетиту густиною 3000 кг/м³ (товщина шару 0,15 м) та шамоту густиною 1 000 кг/м³ (товщина шару 0,20 м; ступінь чорноти 0,72), розігрівали від 20 °С до 1300 °С зі швидкістю 130 °С/год. Температура навколишнього повітря – 20 °С. Коефіцієнти теплопровідності та теплоємності розрахуйте скориставшись табл. 2.5.

3. Визначте температуру поверхні зіткнення шарів після 9 год нагріву, якщо відомо, що піч, яку викладено з динасу густиною $1\,900\text{ кг/м}^3$ (товщина шару $0,24\text{ м}$) та шамоту густиною 800 кг/м^3 (товщина шару $0,12\text{ м}$; ступінь чорноти $0,79$), розігрівали від $22\text{ }^\circ\text{C}$ до $1\,100\text{ }^\circ\text{C}$ зі швидкістю $100\text{ }^\circ\text{C/год}$. Температура навколишнього повітря – $22\text{ }^\circ\text{C}$. Коефіцієнти теплопровідності та теплоємності розрахуйте скориставшись табл. 2.5.

4. Визначте температуру поверхні зіткнення шарів після 2 год нагріву, якщо відомо, що піч, яку викладено з магнезиту густиною $2\,600\text{ кг/м}^3$ (товщина шару $0,30\text{ м}$) та шамоту густиною 1000 кг/м^3 (товщина шару $0,2\text{ м}$; ступінь чорноти $0,72$), розігрівали від $20\text{ }^\circ\text{C}$ до $1000\text{ }^\circ\text{C}$ зі швидкістю $300\text{ }^\circ\text{C/год}$. Температура навколишнього повітря – $20\text{ }^\circ\text{C}$. Коефіцієнти теплопровідності та теплоємності розрахуйте скориставшись табл. 2.5.

5. Визначте температуру в шарі шлаковати, який розташовано на глибині $0,03\text{ м}$ від зовнішньої поверхні, після 5 год нагріву, якщо відомо, що піч, яку викладено з динасу густиною $1\,900\text{ кг/м}^3$ (товщина шару $0,20\text{ м}$) та заізольовано шлаковатою густиною 300 кг/м^3 (товщина шару $0,115\text{ м}$; ступінь чорноти $0,79$), нагрівали від $20\text{ }^\circ\text{C}$ до $1300\text{ }^\circ\text{C}$ зі швидкістю $120\text{ }^\circ\text{C/год}$. Температура навколишнього повітря – $20\text{ }^\circ\text{C}$. Коефіцієнти теплопровідності та теплоємності розрахуйте скориставшись табл. 2.5.

6. Визначте температуру в шарі шамоту, який розташовано на глибині $0,05\text{ м}$ від поверхні розділу, після 6 год нагріву, якщо відомо, що піч, яку викладено з муліту густиною $2\,800\text{ кг/м}^3$ (товщина шару $0,28\text{ м}$) та шамоту густиною $1\,000\text{ кг/м}^3$ (товщина шару $0,15\text{ м}$; ступінь чорноти $0,72$), нагрівали від $20\text{ }^\circ\text{C}$ до $1100\text{ }^\circ\text{C}$ зі швидкістю $150\text{ }^\circ\text{C/год}$. Температура навколишнього повітря – $20\text{ }^\circ\text{C}$. Коефіцієнти теплопровідності та теплоємності розрахуйте скориставшись табл. 2.5.

7. Визначте температуру в шарі шамоту, який розташовано на глибині $0,06\text{ м}$ від зовнішньої поверхні, після 5 год нагріву, якщо відомо, що піч, яку викладено з силіманіту густиною $2\,400\text{ кг/м}^3$ (товщина шару $0,12\text{ м}$) та шамоту густиною $1\,200\text{ кг/м}^3$ (товщина шару $0,20\text{ м}$; ступінь чорноти $0,8$), нагрівали від $20\text{ }^\circ\text{C}$ до $1400\text{ }^\circ\text{C}$ зі швидкістю $200\text{ }^\circ\text{C/год}$. Температура навколишнього повітря – $20\text{ }^\circ\text{C}$. Коефіцієнти теплопровідності та теплоємності розрахуйте скориставшись табл. 2.5.

8. Визначте температуру зовнішньої поверхні шамоту через годину після початку охолодження, якщо відомо, що піч, яку викладено з динасу густиною $1\,900\text{ кг/м}^3$ (товщина шару $0,25\text{ м}$) та шамоту густиною 800 кг/м^3 (товщина шару $0,18\text{ м}$; ступінь чорноти $0,79$), розігрівали від $20\text{ }^\circ\text{C}$ до $1\,000\text{ }^\circ\text{C}$ зі швидкістю $150\text{ }^\circ\text{C/год}$, при $1\,000\text{ }^\circ\text{C}$ проводили витримку впродовж 2 год і охолоджували до $500\text{ }^\circ\text{C}$ зі швидкістю $100\text{ }^\circ\text{C/год}$. Температура навколишнього повітря – $20\text{ }^\circ\text{C}$. Коефіцієнти теплопровідності та теплоємності розрахуйте скориставшись табл. 2.5.

9. Визначте температуру на поверхні зіткнення шарів після 5 год нагріву, якщо відомо, що піч, яку викладено з карборунду густиною $2\,300\text{ кг/м}^3$ (товщина шару $0,24\text{ м}$) та динасу густиною $1\,100\text{ кг/м}^3$ (товщина шару $0,20\text{ м}$; ступінь чорноти $0,75$), розігрівали від $22\text{ }^\circ\text{C}$ до $1300\text{ }^\circ\text{C}$ зі швидкістю $200\text{ }^\circ\text{C/год}$. Температура навколишнього повітря – $22\text{ }^\circ\text{C}$. Коефіцієнти теплопровідності та теплоємності розрахуйте скориставшись табл. 2.5.

10. Визначте температуру зовнішньої поверхні після 4 год нагріву, якщо відомо, що піч, яку викладено з форстериту густиною $3\,000\text{ кг/м}^3$ (товщина шару $0,20\text{ м}$) та шамоту густиною $1\,200\text{ кг/м}^3$ (товщина шару $0,20\text{ м}$; ступінь чорноти $0,79$), розігрівали від $20\text{ }^\circ\text{C}$ до $1300\text{ }^\circ\text{C}$ зі швидкістю $200\text{ }^\circ\text{C/год}$. Температура навколишнього повітря – $20\text{ }^\circ\text{C}$. Коефіцієнти теплопровідності та теплоємності розрахуйте скориставшись табл. 2.5.

11. Визначте температуру в шарі шамоту, який розташовано на глибині $0,05\text{ м}$ від зовнішньої поверхні, після 4 год нагріву, якщо відомо, що піч, яку викладено з периклазошпінельного вогнетриву густиною $3\,000\text{ кг/м}^3$ (товщина шару $0,15\text{ м}$) та шамоту густиною 800 кг/м^3 (товщина шару $0,23\text{ м}$; ступінь чорноти $0,78$), нагрівали від $20\text{ }^\circ\text{C}$ до $1500\text{ }^\circ\text{C}$ зі швидкістю $300\text{ }^\circ\text{C/год}$. Температура навколишнього повітря – $20\text{ }^\circ\text{C}$. Коефіцієнти теплопровідності та теплоємності розрахуйте скориставшись табл. 2.5.

12. Визначте температуру зовнішньої поверхні печі після 10 год нагріву, якщо відомо, що піч, яка викладена з динасу густиною $1\,100\text{ кг/м}^3$ (товщина шару $0,25\text{ м}$; ступінь чорноти $0,8$), розігрівали від $20\text{ }^\circ\text{C}$ до $800\text{ }^\circ\text{C}$ зі швидкістю $50\text{ }^\circ\text{C/год}$. Температура навколишнього повітря після 2 годин нагріву зросла з $20\text{ }^\circ\text{C}$ до $26\text{ }^\circ\text{C}$. Коефіцієнти теплопровідності та теплоємності розрахуйте скориставшись табл. 2.5.

13. Визначте температуру у зовнішньому шарі діатоміту під кінець витримки, якщо відомо, що піч, яку викладено з периклазошпінельного вогнетриву густиною $3\,000\text{ кг/м}^3$ (товщина шару $0,24\text{ м}$) та діатоміту густиною $1\,100\text{ кг/м}^3$ (товщина шару $0,10\text{ м}$; ступінь чорноти $0,8$), нагрівали від $20\text{ }^\circ\text{C}$ до $1200\text{ }^\circ\text{C}$ зі швидкістю $400\text{ }^\circ\text{C/год}$, а потім здійснювали витримку при $1200\text{ }^\circ\text{C}$ впродовж $2,5\text{ год}$. Температура навколишнього повітря – $20\text{ }^\circ\text{C}$. Коефіцієнти теплопровідності та теплоємності розрахуйте скориставшись табл. 2.5.

14. Визначте температуру в шарах, які розташовані на глибині $0,18\text{ м}$ та $0,07\text{ м}$ від зовнішньої поверхні, якщо відомо, що піч, яку викладено з високоглиноземного вогнетриву густиною $1\,330\text{ кг/м}^3$ (товщина шару $0,25\text{ м}$; ступінь чорноти $0,79$), нагрівали від $20\text{ }^\circ\text{C}$ до $1\,400\text{ }^\circ\text{C}$ зі швидкістю $200\text{ }^\circ\text{C/год}$. Температура навколишнього повітря – $20\text{ }^\circ\text{C}$. Коефіцієнти теплопровідності та теплоємності розрахуйте скориставшись табл. 2.5.

15. Визначте температуру на глибині 0,1 м від внутрішньої поверхні і температуру зовнішньої поверхні печі після 9,6 год нагріву, якщо відомо, що піч, яку викладено з глиняної цегли густиною 1800 кг/м^3 (товщина стінки 0,25 м; ступінь чорноти 0,7) розігрівали від 20°C до 700°C зі швидкістю 65°C/год . Температура навколишнього повітря – 20°C . Коефіцієнти теплопровідності та теплоємності розрахуйте скориставшись табл. 2.5.

2.3. Розрахунок тривалості випалу виробів

Основним параметром при виборі раціонального режиму випалу є максимально припустима швидкість нагріву й охолодження виробів та час їх витримки за максимальної температури. Припустимі швидкості нагріву й охолодження керамічних виробів можна визначити, за пропозицією М. М. Доброхотова, за формулою (2.22), у $^\circ\text{C/год}$:

$$v_{\text{прип}} = \frac{\Delta t_{\text{прип}} \cdot a}{k \cdot s^2}, \quad (2.22)$$

де $\Delta t_{\text{прип}}$ – максимально припустима різниця температур у тілі виробу при його нагріві або охолодженні, $^\circ\text{C}$; a – коефіцієнт температуропровідності матеріалу, який визначається за формулою (2.14), $\text{м}^2/\text{год}$; k – коефіцієнт, що залежить від форми тіла, а також від типу та щільності садки: для пластини він дорівнює 0,5, для куба – 0,2, для кулі – 0,167, для циліндра – 0,2–0,25, максимальне значення $k = 0,5$; s – товщина прогріву виробів, м.

При симетричному нагріві з двох боків s дорівнює половині товщини пластини або радіусу циліндра чи кулі; при несиметричному нагріві з двох боків $s = 0,75$ товщини пластини та при однобічному нагріві – товщині пластини.

Величина $\Delta t_{\text{прип}}$ залежить від фізичних властивостей матеріалу (міцності, коефіцієнта розширення, модуля пружності, коефіцієнта Пуассона) і не залежить від розмірів тіла. Ця величина характеризує чутливість матеріалу до нагріву і зазвичай визначається експериментальним шляхом. Для деяких матеріалів значення $\Delta t_{\text{прип}}$ наведені у табл. 2.6.

Припустиму швидкість нагріву плоских керамічних виробів можна визначити за наближеною формулою М. М. Доброхотова (2.23), $^\circ\text{C/год}$:

$$v_{\text{прип}} = \frac{40 \cdot \Delta t_{\text{прип}}}{(100 \cdot s)^2}. \quad (2.23)$$

Таблиця 2.6 – Припустимі перепади температур у масі при випалі

Найменування матеріалу	Нагрів, °С			Охолодження, °С		
	100–700	700–1000	1000–1400	1400–1000	1000–850	850–100
Спондилова глина	110	85	–	–	30	125
Силідівська глина	115	77	–	–	33	123
Часів'ярська глина	120	85	80	30	125	140
Дружківська глина	120	80	75	30	120	135
Часів'ярська глина 60 % і шамот 40 %	135	75	70	25	100	130

Час витримки за кінцевої температури для вирівнювання температур (до 90–95 %) можна визначити за формулою (2.24), год:

$$\tau_{\text{вир}} = 700 \cdot s^2. \quad (2.24)$$

Час нагріву або охолодження у відомому інтервалі температур від t_1 до t_2 за формулою (2.25) дорівнює, у год:

$$\tau_i = \frac{t_2 - t_1}{v_{\text{прип}}}. \quad (2.25)$$

Приклад розрахунку

Розрахувати режим випалу нормальної шамотної цегли з часів'ярської глини при симетричному нагріві з двох боків. Абсолютна вологість цегли, що завантажується у піч $w_a = 5\%$. Вага сухої цегли 3,8 кг, товщина цегли 0,066 м, довжина та висота відповідно 0,23 та 0,113 м.

Розв'язання задачі слід починати з визначення часу, необхідного для нагріву виробу до 100 °С. Пам'ятаючи про те, що абсолютна вологість матеріалу відповідає відношенню кількості або ваги вологи, що міститься у матеріалі, до ваги абсолютно сухого матеріалу, розраховують кількість вологи, яка випаровується ($G_{\text{вол}}$):

$$G_{\text{вол}} = 3,8 \cdot 0,05 = 0,19 \text{ кг.}$$

Враховуючи розміри цегли, визначають активну поверхню теплообміну та випаровування (F) однієї цегли, що стоїть на ребрі:

$$F = 2 \cdot 0,23 \cdot 0,113 + 0,23 \cdot 0,066 + 2 \cdot 0,113 \cdot 0,066 = 0,082 \text{ м}^2.$$

Кількість вологи на 1 м^2 активної поверхні (G_F) становитиме:

$$G_F = \frac{G_{\text{вол}}}{F} = \frac{0,19}{0,082} = 2,32 \text{ кг/м}^2.$$

Випал шамотних виробів у більшості випадків відбувається у тунельних печах, де у низькотемпературних зонах основним способом теплообміну є конвекція. За таких умов інтенсивність випаровування або знімання вологи з активної поверхні можна прийняти приблизно $0,3 \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{год)}$. Тоді час, необхідний для нагріву цегли до $100 \text{ }^\circ\text{C}$ становитиме:

$$\tau_1 = \frac{2,32}{0,3} = 7,73 \text{ год.}$$

Далі у відповідності до табл. 2.6 розраховують тривалість періодів нагріву, витримки та охолодження.

Для періоду нагріву від 100 до $700 \text{ }^\circ\text{C}$ $\Delta t_{\text{прип}} = 120 \text{ }^\circ\text{C}$ (табл. 2.6). Припустима швидкість підйому температур при симетричному нагріві цегли з двох боків ($s = 0,033 \text{ м}$) за формулою (2.23) становитиме:

$$v_{\text{прип}} = \frac{40 \cdot 120}{3,3^2} = 441 \text{ }^\circ\text{C/год.}$$

Час нагріву за формулою (2.25) буде дорівнювати:

$$\tau_2 = \frac{700 - 100}{441} = 1,36 \text{ год.}$$

Для періоду нагріву від 700 до $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ $\Delta t_{\text{прип}} = 85 \text{ }^\circ\text{C}$ (табл. 2.6). Припустима швидкість підйому температур за формулою (2.23) становитиме:

$$v_{\text{прип}} = \frac{40 \cdot 85}{3,3^2} = 312 \text{ }^\circ\text{C/год.}$$

Час нагріву за формулою (2.25) буде дорівнювати:

$$\tau_3 = \frac{1000 - 700}{312} = 0,96 \text{ год.}$$

Для періоду нагріву від 1000 до 1400 °С $\Delta t_{\text{прип}} = 80$ °С (табл. 2.6). Припустима швидкість підйому температур за формулою (2.23) становитиме:

$$v_{\text{прип}} = \frac{40 \cdot 80}{3,3^2} = 294 \text{ °С/год.}$$

Час нагріву за формулою (2.25) буде дорівнювати:

$$\tau_4 = \frac{1400 - 1000}{294} = 1,36 \text{ год.}$$

Час витримки за кінцевої температури за формулою (2.24) буде дорівнювати:

$$\tau_{\text{вигр}} = \tau_5 = 0,07 \cdot 3,3^2 = 0,76 \text{ год.}$$

Для періоду охолодження від 1400 до 1000 °С $\Delta t_{\text{прип}} = 30$ °С (див. табл. 2.6). Припустима швидкість зниження температур за формулою (2.23) становитиме:

$$v_{\text{прип}} = \frac{40 \cdot 30}{3,3^2} = 110 \text{ °С/год.}$$

Час нагріву за формулою (2.25) буде дорівнювати:

$$\tau_6 = \frac{1400 - 1000}{110} = 3,64 \text{ год.}$$

Для періоду охолодження від 1000 до 850 °С $\Delta t_{\text{прип}} = 125$ °С (див. табл. 2.6). Припустима швидкість зниження температур за формулою (2.23) становитиме:

$$v_{\text{прип}} = \frac{40 \cdot 125}{3,3^2} = 459 \text{ °С/год.}$$

Час нагріву за формулою (2.25) буде дорівнювати:

$$\tau_7 = \frac{1000 - 850}{459} = 0,33 \text{ год.}$$

Для періоду охолодження від 850 до 100 °С $\Delta t_{\text{прип}} = 140$ °С (див. табл. 2.6). Припустима швидкість зниження температур за формулою (2.23) становитиме:

$$v_{\text{прип}} = \frac{40 \cdot 140}{3,3^2} = 514 \text{ °С/год.}$$

Час нагріву за формулою (2.25) буде дорівнювати:

$$\tau_8 = \frac{850 - 100}{514} = 1,46 \text{ год.}$$

Загальна тривалість випалу буде дорівнювати сумарному часу нагріву, витримки та охолодження:

$$\tau_{\text{заг}} = 7,73 + 1,36 + 0,96 + 1,36 + 0,76 + 3,64 + 0,33 + 1,46 = 17,6 \text{ год.}$$

Таким чином, за оптимальним режимом випалу, розрахованому за допомогою припустимої різниці температур у тілі виробу при його нагріві, витримки та охолодженні, встановлено, що при симетричному нагріві з двох боків загальна тривалість випалу нормальної шамотної цегли становить не більше 18 год.

Задачі для практики

Використайте припустимі перепади температур у масі при нагріві та охолодженні відповідних матеріалів (див. табл. 2.6) для розв'язання таких задач:

1. Розрахуйте режим випалу рядової порожнистої цегли зі спондилової глини при симетричному нагріві з двох боків. Абсолютна вологість цегли, що завантажується у піч, $w_a = 4$ %. Вага сухої цегли 3,5 кг, товщина цегли 65 мм, довжина та висота відповідно 250 та 120 мм. Знімання вологи з активної поверхні приблизно 0,3 кг/(м²·год).

2. Розрахуйте режим випалу рядової порожнистої цегли зі спондилової глини при несиметричному нагріві з двох боків. Абсолютна вологість цегли, що завантажується у піч, $w_a = 4,2$ %. Вага сухої цегли 3,6 кг,

товщина цегли 65 мм, довжина та висота відповідно 250 та 120 мм. Знімання вологи з активної поверхні приблизно 0,31 кг/(м²·год).

3. Розрахуйте режим випалу рядової порожнистої цегли зі спонділової глини при однобічному нагріві. Абсолютна вологість цегли, що завантажується у піч, $w_a = 4,3$ %. Вага сухої цегли 3,6 кг, товщина цегли 65 мм, довжина та висота відповідно 250 та 120 мм. Знімання вологи з активної поверхні приблизно 0,32 кг/(м²·год).

4. Розрахуйте режим випалу цегли «Євро 1» з силідівської глини при симетричному нагріві з двох боків. Абсолютна вологість цегли, що завантажується у піч, $w_a = 4,5$ %. Вага сухої цегли 3,7 кг, товщина цегли 65 мм, довжина та висота відповідно 250 та 90 мм. Знімання вологи з активної поверхні приблизно 0,33 кг/(м²·год).

5. Розрахуйте режим випалу цегли «Євро 1» з силідівської глини при несиметричному нагріві з двох боків. Абсолютна вологість цегли, що завантажується у піч, $w_a = 4,6$ %. Вага сухої цегли 3,8 кг, товщина цегли 65 мм, довжина та висота відповідно 250 та 90 мм. Знімання вологи з активної поверхні приблизно 0,34 кг/(м²·год).

6. Розрахуйте режим випалу потовщеної цегли з силідівської глини при несиметричному нагріві з двох боків. Абсолютна вологість цегли, що завантажується у піч, $w_a = 4,7$ %. Вага сухої цегли 3,9 кг, товщина цегли 88 мм, довжина та висота відповідно 250 та 120 мм. Знімання вологи з активної поверхні приблизно 0,35 кг/(м²·год).

7. Розрахуйте режим випалу нормальної шамотної цегли з дружківської глини при симетричному нагріві з двох боків. Абсолютна вологість цегли, що завантажується у піч, $w_a = 4,9$ %. Вага сухої цегли 3,9 кг, товщина цегли 65 мм, довжина та висота відповідно 250 та 120 мм. Знімання вологи з активної поверхні приблизно 0,36 кг/(м²·год).

8. Розрахуйте режим випалу нормальної шамотної цегли з дружківської глини при несиметричному нагріві з двох боків. Абсолютна вологість цегли, що завантажується у піч, $w_a = 5$ %. Вага сухої цегли 4,0 кг, товщина цегли 65 мм, довжина та висота відповідно 250 та 120 мм. Знімання вологи з активної поверхні приблизно 0,37 кг/(м²·год).

9. Розрахуйте режим випалу нормальної шамотної цегли з дружківської глини при однобічному нагріві. Абсолютна вологість цегли, що завантажується у піч, $w_a = 5,1$ %. Вага сухої цегли 4,1 кг, товщина цегли 65 мм, довжина та висота відповідно 250 та 120 мм. Знімання вологи з активної поверхні приблизно 0,38 кг/(м²·год).

10. Розрахуйте режим випалу модульної цегли з суміші часів'ярської глини та шамоту при симетричному нагріві з двох боків. Абсолютна вологість цегли, що завантажується у піч, $w_a = 6$ %. Вага сухої цегли 5,0 кг, товщина цегли 120 мм, довжина та висота відповідно 288 та 138 мм. Знімання вологи з активної поверхні приблизно 0,4 кг/(м²·год).

11. Розрахуйте режим випалу модульної цегли з суміші часів'ярської глини та шамоту при несиметричному нагріві з двох боків. Абсолютна вологість цегли, що завантажується у піч, $w_a = 6\%$. Вага сухої цегли 4,9 кг, товщина цегли 120 мм, довжина та висота відповідно 288 та 138 мм. Знімання вологи з активної поверхні приблизно $0,4 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$.

12. Розрахуйте режим випалу модульної цегли з суміші часів'ярської глини та шамоту при несиметричному нагріві з двох боків. Абсолютна вологість цегли, що завантажується у піч, $w_a = 5,8\%$. Вага сухої цегли 4,8 кг, товщина цегли 65 мм, довжина та висота відповідно 288 та 138 мм. Знімання вологи з активної поверхні приблизно $0,39 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$.

13. Розрахуйте режим випалу рядової порожнистої цегли з часів'ярської глини при симетричному нагріві з двох боків. Абсолютна вологість цегли, що завантажується у піч, $w_a = 4,7\%$. Вага сухої цегли 3,7 кг, товщина цегли 65 мм, довжина та висота відповідно 250 та 120 мм. Знімання вологи з активної поверхні приблизно $0,31 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$.

14. Розрахуйте режим випалу нормальної цегли з часів'ярської глини при несиметричному нагріві з двох боків. Абсолютна вологість цегли, що завантажується у піч, $w_a = 4,8\%$. Вага сухої цегли 3,8 кг, товщина цегли 65 мм, довжина та висота відповідно 250 та 120 мм. Знімання вологи з активної поверхні приблизно $0,32 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$.

15. Розрахуйте режим випалу нормальної цегли з часів'ярської глини при однобічному нагріві. Абсолютна вологість цегли, що завантажується у піч, $w_a = 4,9\%$. Вага сухої цегли 3,9 кг, товщина цегли 65 мм, довжина та висота відповідно 250 та 120 мм. Знімання вологи з активної поверхні приблизно $0,33 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$.

Список літератури до розділу 2

1. Лыков А. В. Теория тепло- и массопереноса / А. В. Лыков, Ю. О. Михайлов. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 534 с.
2. Роговой М. И. Расчеты и задачи по теплотехническому оборудованию предприятий промышленности строительных материалов: учебник для вузов / М. И. Роговой, М. Н. Кондакова, М. Н. Сагановский. – М.: Стройиздат, 1975. – 320 с.
3. Волгина Ю. М. Теплотехническое оборудование стекольных заводов / Ю. М. Волгина. – Л.: Стройиздат, 1982. – 276 с.
4. Роговой М. И. Теплотехническое оборудование керамических заводов: учебник для техникумов / М. И. Роговой. – М.: Стройиздат, 1983. – 300 с.
5. Мороз И. И. Технология фарфоро-фаянсовых изделий / И. И. Мороз. – М.: Стройиздат, 1984. – 334 с.
6. Дудеров И. Г. Общая технология силикатов / И. Г. Дудеров, Г. М. Матвеев, В. Б. Суханов. – М.: Стройиздат, 1987. – 560 с.

7. Перегудов В. В. Тепловые процессы и установки в технологии строительных изделий и деталей: учебник для вузов / В. В. Перегудов, М. И. Роговой. – М.: Стройиздат, 1983. – 416 с.
8. Четкин А. В. Теплотехника: учебник для хим.-техн. спец. вузов / А. В. Четкин, Н. А. Занемонец. – М.: Высшая школа, 1986. – 344 с.
9. Левченко П. В. Расчеты печей и сушил силикатной промышленности / П. В. Левченко. – М.: Высшая школа, 1968. – 366 с.
10. Крупа А. А., Городов В. С. Химическая технология керамических материалов: Учеб. пособие. / А. А. Крупа, В. С. Городов. – К.: Вища школа, 1990. – 399 с.
11. Кошкарёв В. Н., Кучеренко А. А. Тепловые установки: Учебник / В. Н. Кошкарёв, А. А. Кучеренко. – К.: Вища школа, 1990.
12. Ралко А. В. Теплотехника, тепловые процессы и агрегаты в технологии тугоплавких неметаллических и силикатных материалов. / А. В. Ралко, А. А. Крупа, Н. Н. Племянников. – Киев: УМК ВО, 1993. – 396 с.
13. Гойхман В. Ю. Печная теплотехника в производстве стекла: техн. пособ. / В. Ю. Гойхман, В. Н. Руслов, В. А. Костыря. – Харьков: Факт, 1997. – 288 с.
14. Дуников О. В. Методичні вказівки для курсового проектування і теплотехнічних розрахунків конвеєрних ліній по виробництву керамічних плиток / О. В. Дуников, М. І. Рищенко. – Харків: ХДПУ, 2000. – 86 с.
15. Драганов Б. Х. Теплотехніка / Б. Х. Драганов, А. А. Долинський, А. В. Мінденко, К. М. Письмений. – Київ: Вища школа, 2005.
16. Бордюженко О. М. Основи термодинаміки, теплотехніка і теплотехнічне обладнання: Ч. 2. Процеси сушіння, випалу і плавлення. Теплова обробка виробів з бетону і залізобетону: навч. посіб. / О. М. Бордюженко. – Рівне: НУВГП, 2010.
17. Кошельник В. М. Основи проектування теплотехнічних установок підприємств промисловості будівельних матеріалів: навч. посіб. / В. М. Кошельник, Ю. В. Шульгін, О. В. Кошельник, В. В. Соловей. – Х.: НТУ «ХПІ», 2010.
18. Гоц В. І. Теплові процеси та установки у виробництві будівельних конструкцій, виробів і матеріалів / В. І. Гоц, В. М. Кошкарёв, В. В. Павлюк, С. А. Тимошенко. – Київ: Основа, 2014. – 472 с.

Розділ 3

ОСНОВИ РОЗРАХУНКУ ПРОЦЕСУ СУШІННЯ

3.1. Визначення параметрів сушильного агента

Сушіння являє собою тепловий процес обробки матеріалів з метою видалення з них вологи шляхом випаровування. Як відомо, для випаровування 1 кг вологи необхідно витратити 2 500 кДж. Випаровування вологи з матеріалу може відбуватись за умови, коли навколишнє середовище не насичене вологою і здатне сприймати водяну пару з поверхні матеріалу. Отже, для того щоб сушіння відбувалось, необхідно, щоб концентрація (парціальний тиск) водяної пари безпосередньо біля поверхні вологого матеріалу ($p_{\text{пов}}$) була більшою за концентрацію водяної пари у навколишньому газовому середовищі (p_c). Якщо $p_c > p_{\text{пов}}$, то буде відбуватись зволоження матеріалу, що супроводжуватиметься конденсацією вологи з навколишнього середовища на його поверхні.

Інтенсивність сушіння буде тим більшою, чим більше є різниця парціальних тисків пари на поверхні матеріалу та у навколишньому середовищі і більшим є приплив теплоти на поверхню матеріалу.

Для кожного виду матеріалу або виробів існує оптимальний режим сушіння, який забезпечує надану продуктивність сушарки за найменших питомих витрат теплоносія та теплоти, а також за найменшого виходу браку виробів під час процесу сушіння. У кожному окремому випадку режим сушіння залежить від початкової та кінцевої вологості матеріалу, температури, вологості теплоносія, а також від конструкції сушарки та виду матеріалу або виробу, що висушується.

Під **швидкістю сушіння** слід розуміти кількість вологи видаленої з матеріалу за одиницю часу з 1 м² поверхні випаровування (кг/м²·год). Середня швидкість сушіння за період часу τ (год) за відомої поверхні випаровування F (м²) і кількості випареної вологи w (кг) становить, кг/(м²·год):

$$v_{\text{сер}} = \frac{w}{F \cdot \tau} \quad (3.1)$$

Величину $v_{\text{сер}}$ також називають інтенсивністю сушіння. За конвективного сушіння тонкостінних виробів вона досягає 0,4 кг/(м²·год), за радіаційного – 3,25 кг/(м²·год). Швидкість сушіння в окремі періоди часу значно змінюється залежно від зміни вологості, температури, фізичних властивостей матеріалу та сушильного агента.

Оптимальна середня швидкість сушіння матеріалів та виробів визначається практичним шляхом з використанням виробничих та лабораторних досліджень або може бути розрахована для виробів простої форми (пластина, циліндр, куля) за методикою А. Ф. Чижського та М. М. Доброхотова. При цьому критерієм виникнення напружень у виробі під час його сушіння є припустимий перепад вологості по товщині виробу.

Максимально припустима швидкість сушіння $v_{\text{макс}}$ пластини завтовшки s у період постійної швидкості за умови рівномірного сушіння всієї поверхні визначається за формулою (3.2), кг/(м²·год):

$$v_{\text{макс}} = \frac{0,09 \cdot A}{(K_c^3 + 1) \cdot s}, \quad (3.2)$$

де A – коефіцієнт, що залежить від температури поверхні виробу, який можна знайти у табл. 3.1; K_c – коефіцієнт чутливості матеріалу (глини) до сушіння, який можна знайти у табл. 3.2; s – товщина пластини (виробу, наприклад, цегли), м.

Таблиця 3.1 – Значення коефіцієнта A та парціальний тиск водяної пари $p_{\text{п}}$ залежно від температури поверхні $t_{\text{м}}$

$t_{\text{м}}, ^\circ\text{C}$	30	35	40	45	50
A	0,53	0,62	0,7	0,75	0,8
$p_{\text{п}}, \text{Н/м}^2$	4244	5225	7379	9587	12338

Таблиця 3.2 – Експериментальні дані значення K_c

Найменування матеріалу	K_c
Глина спондилова	1,17
Глина силідівська	1,13
Глина никифорівська	1,71
Глина часів'ярська	1,89
Глина часів'ярська 60 % + шамот 40 %	1,48
Глина часів'ярська 40 % + шамот 60 %	1,15
Каолін просянівський	0,74
Глина дружківська	1,7
Глина трошківська	2
Фарфорова маса з часів'ярською глиною	1,24
Фарфорова маса з трошківською глиною	1,15

Параметри сушильного агента – температуру та відносну вологість можна визначити скориставшись формулою (3.3), кг/(м²·год):

$$v_{\text{макс}} = 0,112 \cdot \beta_{\text{п}} \cdot (p_{\text{п}} - p_{\text{с}}), \quad (3.3)$$

де $\beta_{\text{п}}$ – коефіцієнт масообміну, 1/год, який можна визначити за формулою (3.4):

$$\beta_{\text{п}} = 0,00168 + 0,00128 \cdot v, \quad (3.4)$$

де v – швидкість сушильного агента, яка повинна знаходитись в межах 1,8–3,0 м/с; $p_{\text{п}}$, $p_{\text{с}}$ – парціальний тиск насиченої водяної пари за температури поверхні виробу $t_{\text{м}}$ та сушильного газового середовища (навколишнього середовища), Н/м² (див. табл. 3.1).

Парціальний тиск навколишнього середовища $p_{\text{с}}$ можна знайти за формулою (3.5), Н/м²:

$$p_{\text{с}} = p_{\text{п}} - \frac{v_{\text{макс}}}{0,112 \cdot \beta_{\text{п}}}. \quad (3.5)$$

Далі за допомогою $I - d$ діаграми за температурою $t_{\text{м}}$, яка є температурою вогкого термометра та визначеним вище $p_{\text{с}}$, знаходяться параметри сушильного агента – температура $t_{\text{с}}$ та відносна вологість $\varphi_{\text{с}}$ для дуже важливого періоду постійної швидкості сушіння.

$I - d$ діаграма, відома також як діаграма Л. К. Рамзіна, наведена на рис. 3.1 та 3.2 відповідно для низькотемпературних та високотемпературних режимів сушіння. Основними параметрами діаграми є тепловміст або ентальпія I , у кДж/кг сухого повітря та вологовміст d , у г/кг сухого повітря. Крім того, на неї нанесені й інші параметри повітря: відносна вологість $\varphi_{\text{с}}$, у %; температура повітря, температура вогкого термометра ($t_{\text{м}} = \text{const}$ – пунктирні лінії) та парціальний тиск водяної пари у вологому повітрі. Лінії постійного вологовмісту ($d = \text{const}$) розташовані вертикально, а лінії постійного тепловмісту ($I = \text{const}$ – адіабати) – похило до вертикалі під кутом 135°.

Лінія насиченого стану повітря $\varphi = 100\%$ поділяє діаграму на дві частини. Верхня частина, що є вище лінії $\varphi = 100\%$, характеризує вологе повітря, яке не насичене водяною парою. За допомогою верхньої частини діаграми визначають необхідні параметри сушильного агента та їх зміну в процесі сушіння. Нижча від лінії $\varphi = 100\%$ частина відповідає насиченому стану вологого повітря у присутності конденсату вологи. Лінія парціальних тисків водяної пари розташована похило у нижній частині діаграми, числові значення наведені праворуч по вертикальній осі у кН/м².

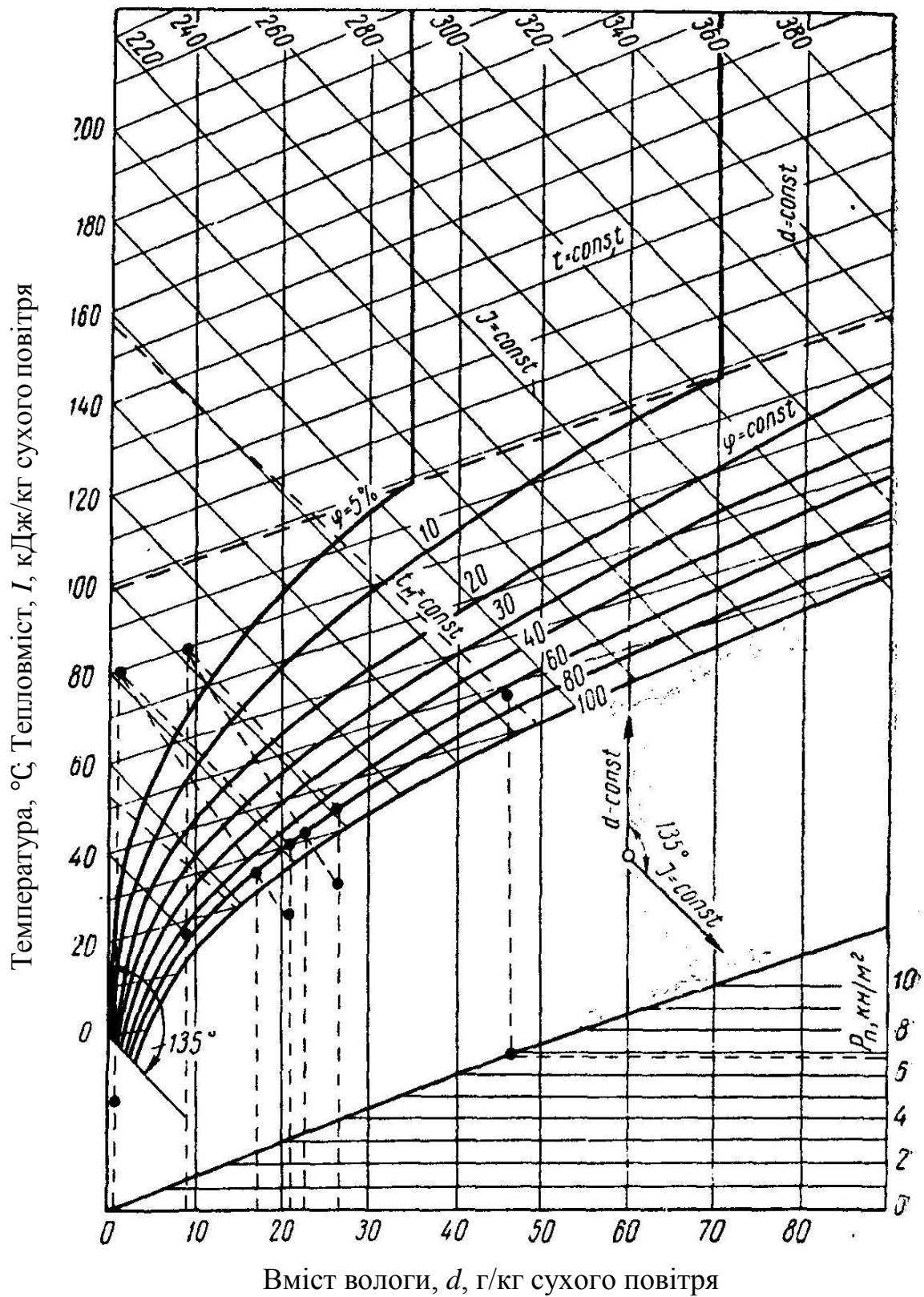
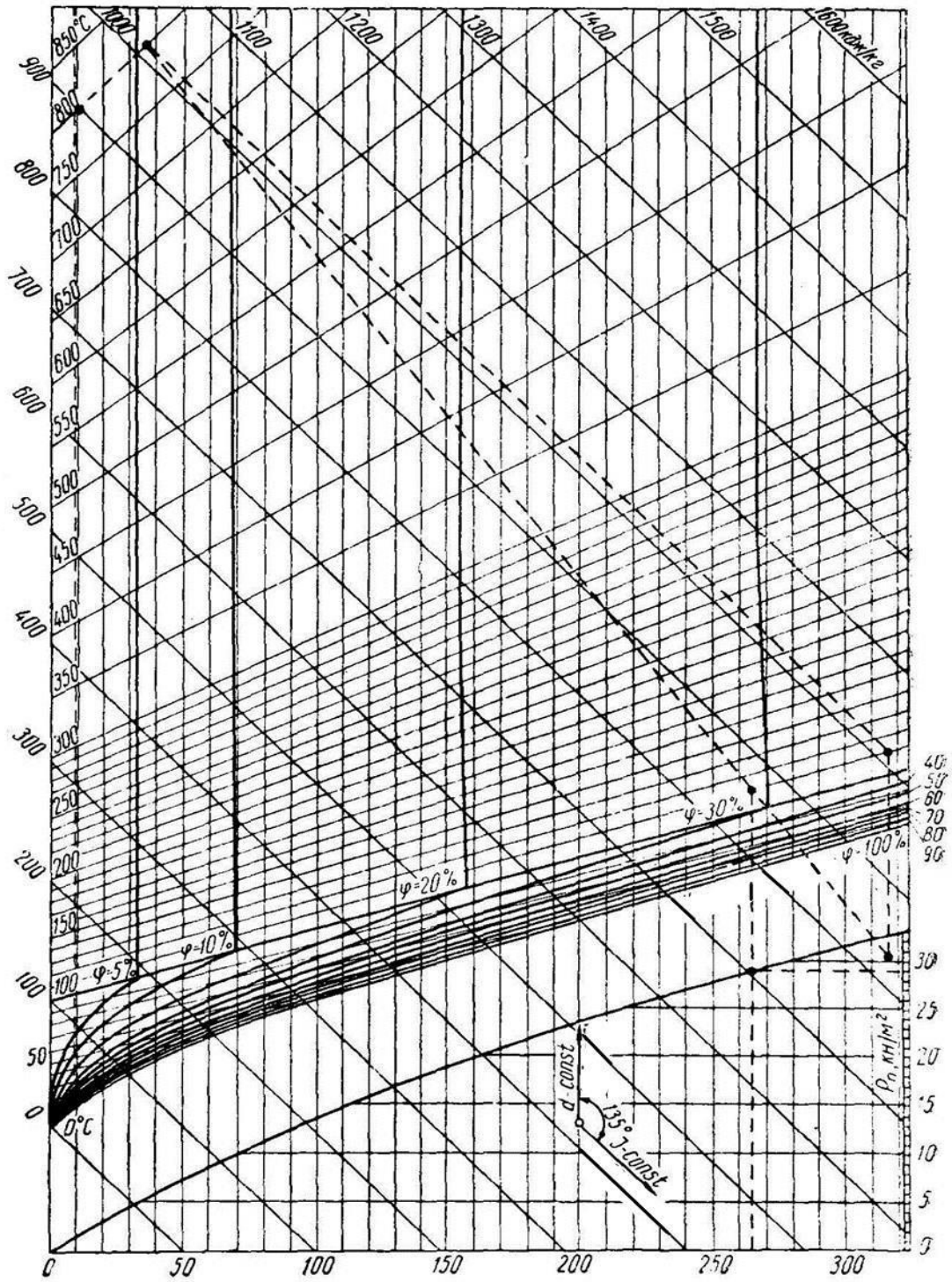


Рис. 3.1. $I - d$ діаграма для низькотемпературних режимів сушіння

Температура, °С; Тепловміст, I , кДж/кг сухого повітря



Вміст води, d , г/кг сухого повітря

Рис. 3.2. $I-d$ діаграма для високотемпературних режимів сушіння

Мінімально припустиму тривалість сушіння від початкової $w_{\text{поч}}$ до кінцевої $w_{\text{к}}$ вологості, %, можна наближено визначити за формулою (3.6), год:

$$\tau \cong 0,91 \cdot s \cdot \frac{W_{\text{поч}} - W_{\text{к}}}{v_{\text{макс}}} \quad (3.6)$$

Приклад розрахунку

Визначити параметри сушильного агента, а також тривалість сушіння нормальної цегли (пластини) зі спондилової глини завтовшки 65 мм від початкової вологості 30 % до кінцевої 8 %. Температура поверхні матеріалу 40 °С.

Розв'язання задачі починають з визначення максимально припустимої швидкості сушіння за формулою (3.2). Для цього, користуючись табл. 3.1 для $t_{\text{м}} = 40$ °С обирають значення коефіцієнта $A = 0,7$, а з табл. 3.2 для виробу зі спондилової глини значення коефіцієнта $K_{\text{с}} = 1,17$. Далі за формулою (3.2) знаходять:

$$v_{\text{макс}} = \frac{0,09 \cdot 0,7}{(1,17^3 + 1) \cdot 0,065} = 0,373 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{год.}$$

Для визначення параметрів сушильного агента необхідно визначити $p_{\text{с}}$, попередньо розрахувавши значення коефіцієнта масообміну за формулою (3.4). В розрахунках швидкість сушильного агента можна прийняти $v = 3$ м/с.

$$\beta_{\text{п}} = 0,00168 + 0,00128 \cdot 3 = 0,00552 \text{ 1/год.}$$

З табл. 3.1 обирають парціальний тиск насиченої водяної пари за температури поверхні виробу $t_{\text{м}} = 40$ °С, $p_{\text{п}} = 7379$ Н/м². Тоді за формулою (3.5) $p_{\text{с}}$ складатиме:

$$p_{\text{с}} = 7379 - \frac{0,373}{0,112 \cdot 0,00552} = 6776 \text{ Н/м}^2 \approx 6,8 \text{ кН/м}^2.$$

Далі за $I - d$ діаграмою (див. рис. 3.1), користуючись лінією парціальних тисків, знаходять точку, що відповідає $p_{\text{с}} = 6,8$ кН/м² і проводять ординату до перетину з пунктирною лінією температури вогкого термометра $t_{\text{м}} = 40$ °С. У точці перетину знаходять параметри сушильного агента: $t_{\text{с}} = 48$ °С, $\varphi_{\text{с}} = 65$ %.

Мінімально припустиму тривалість сушіння визначають за формулою (3.6):

$$\tau \cong 0,91 \cdot 0,065 \cdot \frac{30 - 8}{0,373} = 3,48 \text{ год.}$$

Необхідно окремо звернути увагу на те, що на більшості $I - d$ діаграмах присутня лише одна лінія вогкого термометра $t_m = \text{const}$ (у цьому випадку $t_m = 40 \text{ }^\circ\text{C}$). Це пов'язано з легкістю візуального сприйняття графічної інформації та проблемами перевантаженості діаграми різними параметрами. Проте за необхідності розв'язання подібних задач для $t_m = 30, 35$ або $45 \text{ }^\circ\text{C}$ потрібні лінії досить легко побудувати самостійно. Для цього достатньо знайти точку перетину лінії постійної температури $t = \text{const}$ (значення яких розташовано ліворуч по вертикальній осі діаграми) з лінією насиченого стану повітря $\phi = 100 \%$, та провести з цієї точки пунктирну лінію, що буде проходити паралельно вже нанесеній на діаграмі лінії $t_m = \text{const}$. З незначною похибкою можна також скористатись як лінією $t_m = \text{const}$ найближчою лінією $I = \text{const}$.

Задачі для практики

Скористайтесь табл. 3.1 та 3.2, а також $I - d$ діаграмою на рис. 3.1 для розв'язання таких задач:

1. Визначте тривалість сушіння цегли з силідівської глини завтовшки 65 мм, від початкової вологості 25 % до кінцевої 6 % та знайдіть параметри сушильного агента, якщо температура поверхні дорівнює $35 \text{ }^\circ\text{C}$.

2. Визначте тривалість сушіння потовщеної цегли з силідівської глини завтовшки 88 мм, від початкової вологості 27 % до кінцевої 7 % та знайдіть параметри сушильного агента, якщо температура поверхні дорівнює $35 \text{ }^\circ\text{C}$.

3. Визначте тривалість сушіння цегли з нікіфорівської глини завтовшки 66 мм, від початкової вологості 20 % до кінцевої 5 % та знайдіть параметри сушильного агента, якщо температура поверхні дорівнює $40 \text{ }^\circ\text{C}$.

4. Визначте тривалість сушіння тротуарної цегли з нікіфорівської глини завтовшки 62 мм, від початкової вологості 25 % до кінцевої 5 % та знайдіть параметри сушильного агента, якщо температура поверхні дорівнює $40 \text{ }^\circ\text{C}$.

5. Визначте тривалість сушіння фасонної цегли з часів'ярської глини завтовшки 35 мм, від початкової вологості 18 % до кінцевої 6 % та знайдіть параметри сушильного агента, якщо температура поверхні дорівнює $40 \text{ }^\circ\text{C}$.

6. Визначте тривалість сушіння клінкерної лицьової цегли з суміші часів'ярської глини та шамоту (у співвідношенні 60 % на 40 %) завтовшки 71 мм, від початкової вологості 18 % до кінцевої 5 % та знайдіть параметри сушильного агента, якщо температура поверхні дорівнює 35 °С.

7. Визначте тривалість сушіння клінкерної лицьової цегли з суміші часів'ярської глини та шамоту (у співвідношенні 60 % на 40 %) завтовшки 52 мм, від початкової вологості 17 % до кінцевої 6 % та знайдіть параметри сушильного агента, якщо температура поверхні дорівнює 40 °С.

8. Визначте тривалість сушіння фасонної цегли з суміші часів'ярської глини та шамоту (у співвідношенні 40 % на 60 %) завтовшки 25 мм, від початкової вологості 10 % до кінцевої 2 % та знайдіть параметри сушильного агента, якщо температура поверхні дорівнює 45 °С.

9. Визначте тривалість сушіння фасонної цегли з суміші часів'ярської глини та шамоту (у співвідношенні 40 % на 60 %) завтовшки 30 мм, від початкової вологості 11 % до кінцевої 3 % та знайдіть параметри сушильного агента, якщо температура поверхні дорівнює 45 °С.

10. Визначте тривалість сушіння цегли зі спондилової глини завтовшки 65 мм, від початкової вологості 30 % до кінцевої 6 % та знайдіть параметри сушильного агента, якщо температура поверхні дорівнює 35 °С.

11. Визначте тривалість сушіння клінкерної цегли з дружківської глини завтовшки 52 мм, від початкової вологості 28 % до кінцевої 6 % та знайдіть параметри сушильного агента, якщо температура поверхні дорівнює 35 °С.

12. Визначте тривалість сушіння клінкерної плитки з часів'ярської глини завтовшки 15 мм, від початкової вологості 12 % до кінцевої 1 % та знайдіть параметри сушильного агента, якщо температура поверхні дорівнює 45 °С.

13. Визначте тривалість сушіння фасонної цегли з часів'ярської глини завтовшки 38 мм, від початкової вологості 20 % до кінцевої 7 % та знайдіть параметри сушильного агента, якщо температура поверхні дорівнює 40 °С.

14. Визначте тривалість сушіння клінкерної цегли з дружківської глини завтовшки 71 мм, від початкової вологості 30 % до кінцевої 6 % та знайдіть параметри сушильного агента, якщо температура поверхні дорівнює 40 °С.

15. Визначте тривалість сушіння нормальної шамотної цегли з просянівського каоліну завтовшки 65 мм, від початкової вологості 28 % до кінцевої 6 % та знайдіть параметри сушильного агента, якщо температура поверхні дорівнює 35 °С.

16. Визначте тривалість сушіння клінкерної плитки з суміші часів'ярської глини та шамоту (у співвідношенні 60 % на 40 %) завтовшки

17 мм, від початкової вологості 12 % до кінцевої 2 % та знайдіть параметри сушильного агента, якщо температура поверхні дорівнює 45 °С.

17. Визначте тривалість сушіння порожнистої цегли з суміші часів'ярської глини та шамоту (у співвідношенні 40 % на 60 %) завтовшки 65 мм, від початкової вологості 12 % до кінцевої 4 % та знайдіть параметри сушильного агента, якщо температура поверхні дорівнює 35 °С.

3.2. Визначення витрат тепла та повітря для процесу сушіння

Витрата тепла для сушіння матеріалу залежить від початкового тепловмісту та витрати повітря, що подається для сушіння. Якщо сушіння відбувається за допомогою гарячого повітря, яке підігрівається у калорифері, або відбирається з зони охолодження печі, то його тепловміст можна визначити за $I - d$ діаграмою за відомих $t_{\text{пов}}$ та $d_{\text{поч}}$. Різниця тепловмісту підігрітого повітря та холодного атмосферного, що надходить у калорифер або в зону охолодження печі, являє собою необхідну кількість тепла для підвищення тепловмісту 1 кг сухого повітря. Тому витрата тепла для сушіння без врахування втрат тепла у повітрянагрівачі визначається за формулою (3.7), кДж/год:

$$Q = G_{\text{пов}} \cdot (I_{\text{поч}} - I_{\text{пов}}) - 4,2 \cdot n \cdot t_m, \quad (3.7)$$

де $G_{\text{пов}}$ – витрата повітря для сушіння, кг сухого повітря/год; $I_{\text{поч}}$ – тепловміст підігрітого повітря (початковий), що надходить для сушіння, кДж/кг сухого повітря; $I_{\text{пов}}$ – тепловміст холодного атмосферного повітря, кДж/кг сухого повітря; $4,2 \cdot n \cdot t_m$ – кількість тепла, що потрапляє в сушарку з вологою матеріалу, кДж/год; $4,2$ кДж/кг – теплоємність води; n – кількість випареної з матеріалу вологи, кг/год; t_m – температура матеріалу, °С.

Різниця $I_{\text{поч}} - I_{\text{пов}}$ – це кількість тепла у кДж/кг сухого повітря, що витрачається на підігрів повітря. Визначення величини $I_{\text{поч}}$ та $I_{\text{пов}}$ за сушіння гарячим повітрям або сумішшю димових газів (продуктів згорання) з повітрям найбільш просто виконується за допомогою $I - d$ діаграм (див. рис. 3.1 та 3.2).

Витрата повітря для сушіння залежить від кількості вологи, що випаровується з матеріалу, та від зміни його вологовмісту під час процесу сушіння, тобто від кількості вологи у вигляді водяної пари, яку сушильний агент повинен видалити виходячи з сушильної камери. Кількість вологи, що випаровується з матеріалу, можна визначити за формулою (3.8), кг/год:

$$n = P_c \cdot \frac{w_{\text{поч}} - w_k}{100 - w_{\text{поч}}}, \quad (3.8)$$

де P_c – надана продуктивність сушарки за висушеним матеріалом, кг/год; $w_{\text{поч}}$ та w_k – відповідно надані початкова та кінцева відносні вологості матеріалу, %.

Витрата повітря для сушіння може бути визначеною за формулою (3.9), кг сухого повітря/год:

$$G_{\text{пов}} = \frac{1000 \cdot n}{d_k - d_{\text{пов}}}, \quad (3.9)$$

де d_k – кінцевий вологовміст повітря, що залишає сушарку, г/кг сухого повітря; $d_{\text{пов}}$ – початковий вологовміст повітря, що надходить до сушарки, г/кг сухого повітря. Обидва значення знаходяться за $I - d$ діаграмою.

Використання $I - d$ діаграм також дає змогу проаналізувати різні процеси, пов'язані зі зміною параметрів сушильного агента, а саме, підігріву сушильного агента, змішування димових газів з повітрям, випаровування вологи з матеріалу, сушіння з урахуванням видатків тепла у навколишнє середовище, визначення витрат сухого повітря для процесу сушіння, витрат тепла та ряд інших завдань сушильного процесу. Деякі приклади використання $I - d$ діаграм розглядаються нижче.

3.2.1. Процес сушіння підігрітим повітрям

Розв'язання задач для процесу сушіння підігрітим повітрям пов'язано з побудовою на $I - d$ діаграмі певних точок і ліній, що характеризують зміну параметрів сушильного агента впродовж сушіння. За допомогою цих побудовань можна легко визначити необхідні витрати тепла та повітря.

Вихідними параметрами атмосферного (холодного) повітря є температура $t_{\text{пов}}$ та відносна вологість $\varphi_{\text{пов}}$, які залежать від пори року та місцевості і за необхідності можуть бути знайдені за довідковими даними. За наданими $t_{\text{пов}}$ та $\varphi_{\text{пов}}$ атмосферного повітря на діаграмі знаходять точку А, як показано на рис. 3.3. Для цієї точки вміст вологи відповідає $d_{\text{пов}}$ та тепловміст – $I_{\text{пов}}$.

Підігрів повітря (у повітронагрівачі, у зоні охолодження печі) не змінює величину $d_{\text{пов}}$, тому на $I - d$ діаграмі підвищення температури повітря від $t_{\text{пов}}$ до $t_{\text{поч}}$ зображується прямою АВ. У точці В отримують початкові параметри повітря (підігрітого), що надходить у сушарку: $t_{\text{поч}}$, $d_{\text{пов}}$, $I_{\text{поч}}$, ($d_{\text{пов}} = d_{\text{пов}}$).

Якщо вважати, що у процесі сушіння тепло витрачається тільки на випаровування води, можна одержати теоретичний процес сушіння (без витрат тепла у навколишнє середовище та без витрат тепла на нагрів матеріалу, що висушується, та транспортуючих пристроїв). Для цього з точки В лінією постійного тепловмісту повітря $I = \text{const}$ слід провести пряму до перетину з лінією постійного кінцевого параметра процесу сушіння – t_k та отримати точку С (див. рис. 3.3).

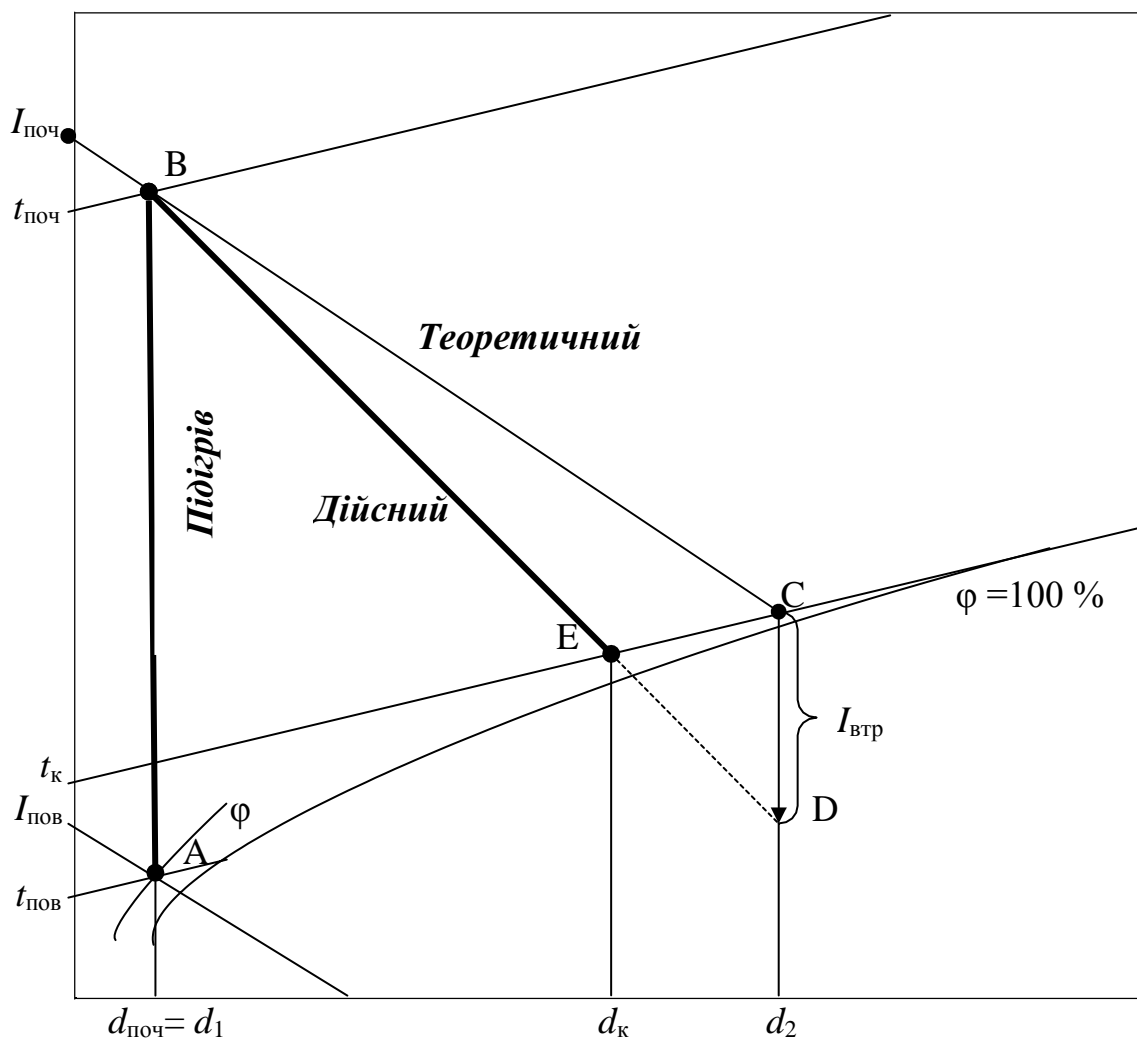


Рис. 3.3 – Побудова на $I - d$ діаграмі процесу сушіння повітрям

На $I - d$ діаграмі теоретичний процес сушіння зображується прямою ВС, для якого витрати повітря будуть дорівнювати (за формулою 3.9), кг сухого повітря/год:

$$G_{\text{теор}} = \frac{1000 \cdot n}{d_2 - d_1},$$

де d_2 – кінцевий вологовміст повітря наприкінці теоретичного процесу, г/кг сухого повітря (знаходиться за абсцисою з точки С); $d_1 = d_{\text{поч}}$ – початковий вологовміст повітря, г/кг сухого повітря. Кількість вологи, що випаровується з матеріалу n (кг/год) визначається за формулою (3.8).

Дійсний процес сушіння обов'язково супроводжується втратами тепла, тобто проходить із зменшенням тепловмісту повітря. Для побудови дійсного процесу сушіння потрібно знати величину зміни тепловмісту повітря наприкінці процесу сушіння. Ця величина повинна бути відкладена донизу від точки С лінією постійного вологовмісту повітря $d = \text{const}$ для отримання допоміжної точки D. Поєднавши точки В та D прямою, у місці її перетину з лінією постійного кінцевого параметра процесу сушіння – t_k , отримують на діаграмі точку Е як кінцеву точку дійсного процесу сушіння (див. рис. 3.3). Дійсний процес сушіння буде зображений прямою ВЕ.

Для знаходження точки D необхідно розрахувати витрати тепла у навколишнє середовище, на нагрів матеріалу, що висушується, та транспортуючих пристроїв.

Для сушарок безперервної дії сума втрат тепла відповідно до формули (3.10) буде дорівнювати, кДж/год:

$$q_{\text{втр}} = q_{\text{м}} + q_{\text{тр}} + q_{\text{нс}} + q_{\text{нещ}}, \quad (3.10)$$

де $q_{\text{м}}$ – витрата тепла на нагрів матеріалу, що висушується; $q_{\text{тр}}$ – витрата тепла на нагрів транспортуючих пристроїв; $q_{\text{нс}}$ – втрати тепла крізь стінки сушарки у навколишнє середовище; $q_{\text{нещ}}$ – втрати тепла через нещільність стінок сушарки (усі у кДж/год).

Витрата тепла на нагрів матеріалу, що висушується, розраховується за формулою (3.11), кДж/год:

$$q_{\text{м}} = P_{\text{с}} \cdot c_{\text{м}} \cdot (t_{\text{к}} - t_{\text{поч}}), \quad (3.11)$$

де $c_{\text{м}}$ – теплоємність висушеного матеріалу за кінцевої вологості $w_{\text{к}}$, яка розраховується за формулою (3.12), кДж/(кг·°С):

$$c_{\text{м}} = c_{\text{с}} \cdot \frac{100 - w_{\text{к}}}{100} + \frac{4,2 \cdot w_{\text{к}}}{100}, \quad (3.12)$$

де $c_{\text{с}}$ – теплоємність абсолютно сухого матеріалу, кДж/(кг·°С) (є або наданим параметром, або обирається з довідників, на кшталт табл. 3.3); $t_{\text{к}}$, $t_{\text{поч}}$ – кінцева температура матеріалу при виході з сушарки та початкова температура матеріалу, що надходить у сушарку, °С.

Витрата тепла на нагрів транспортуючих пристроїв (вагонеток, конвеєра та інших) розраховується за формулою (3.13), кДж/год:

$$q_{\text{тр}} = G_{\text{тр}} \cdot c_{\text{сер.м}} \cdot (t_{\text{к}} - t_{\text{поч}}), \quad (3.13)$$

де $G_{\text{тр}}$ – вага транспортуючого пристрою, що виходить із сушарки за годину, кг/год; $c_{\text{сер.м}}$ – середня теплоємність матеріалу транспортуючих пристроїв, кДж/(кг·°С) (якщо транспортуючі пристрої виконані із різних матеріалів, то розрахунок нагріву ведеться для кожного матеріалу окремо, а потім складаються їх значення); $t_{\text{к}}$, $t_{\text{поч}}$ – кінцева та початкова температура матеріалу транспортуючих пристроїв, °С.

Втрати тепла крізь стінки сушарки у навколишнє середовище розраховуються за формулою (3.14), кДж/год:

$$q_{\text{нс}} = 3,6 \cdot K \cdot (t_{\text{вн}} - t_{\text{нс}}) \cdot F, \quad (3.14)$$

де K – коефіцієнт теплопередачі, який може бути розрахований, якщо відомі товщини стінок сушарки, коефіцієнти їх теплопровідності, а також коефіцієнти тепловіддачі від газів (середовища, що зігріває) на стінки сушарки та від зовнішньої поверхні сушарки у довкілля за емпіричною формулою: $K = 1/(0,01 + \sum s/\lambda + 0,07)$; у розрахунках процесу сушіння підігрітим повітрям за невисоких температур K може бути взятий у межах $1,0 \div 2,3$ Вт/(м²·°С), для високотемпературних режимів сушіння (за участі димових газів) у межах $3,0 \div 4,5$ Вт/(м²·°С) і більше; $t_{\text{вн}}$, $t_{\text{нс}}$ – середні температури внутрішньої поверхні сушильної камери та навколишнього середовища (повітря), °С; F – поверхня тепловіддачі стінок сушарки, м², при невеликій товщині стінок розраховується за зовнішніми розмірами сушарки (для тунельних сушарок F є також зовнішня поверхня стінок та склепіння).

Втрати тепла через нещільності стін сушарки приблизно складають 5–10 % від суми втрат тепла на сушіння.

Визначивши загальні втрати тепла у сушарці $q_{\text{втр}}$, за формулою (3.15) знаходять величину зменшення тепловмісту повітря наприкінці теоретичного процесу сушіння (тобто відносно точки С), кДж/кг сухого повітря:

$$I_{\text{втр}} = \frac{q_{\text{втр}}}{G_{\text{теор}}}. \quad (3.15)$$

Величина $I_{втр}$ виражена у тих же одиницях тепловмісту, як і на $I - d$ діаграмі, тому її відкладають від точки С донизу та одержують допоміжну точку D (див. рис. 3.3).

Пряма BD показує напрямок дійсного процесу сушіння з урахуванням теплових втрат. У місці перетину прямої BD з лінією постійного кінцевого параметра процесу сушіння – t_k , знаходять на діаграмі точку E. Дійсний процес сушіння зображується прямою BE.

Далі за $I - d$ діаграмою, за допомогою абсциси з точки E знаходять величину кінцевого вологовмісту d_k і за формулою (3.9) визначають дійсну витрату повітря.

Таблиця 3.3 – Середня теплоємність деяких матеріалів

Матеріал	c_s , кДж/кг·°C	Матеріал	c_s , кДж/кг·°C
Антрацит	0,908	Пісок кварцовий	0,796
Вапняк	0,921	Польовий шпат	0,800
Глина	0,921	Силіманіт	0,837
Динас	0,796	Фарфор	1,089
Доломіт	0,930	Форстерит	0,888
Каолін	0,800	Хромомагnezит	0,754
Кераміка	0,837	Цегла будівельна	0,921
Крейда	0,879	Шамот	0,837
Магnezит	0,963	Шлак доменний	0,754

Приклад розрахунку

Визначити витрати тепла та повітря для сушіння будівельної цегли у тунельній сушарці продуктивністю 700 кг/год висушених виробів. Вироби висушуються від початкової вологості 20 % до кінцевої 6 %. Сушіння відбувається атмосферним повітрям з температурою 17 °C та відносною вологістю 70 %, підігрітим до 120 °C. Кінцева температура процесу сушіння 40 °C.

Розв'язання задачі починають з побудування на $I - d$ діаграмі теоретичного процесу сушіння. За наданими $t_{пов} = 17$ °C та $\varphi_{пов} = 70$ % на діаграмі знаходять точку А, як це показано на рис. 3.4. Для цієї точки вологовміст відповідає $d_{пов} = 9$ г/кг сухого повітря та тепловміст $I_{пов} = 40$ кДж/кг сухого повітря.

Підвищення температури повітря від $t_{пов} = 17$ °C до $t_{поч} = 120$ °C зображується на діаграмі прямою АВ. У точці В отримують початкові параметри повітря (підігрітого), що надходить у сушарку: $t_{поч} = 120$ °C, $I_{поч} = 142$ кДж/кг сухого повітря, $d_{поч} = d_1 = 9$ г/кг сухого повітря.

Для побудови теоретичного процесу з точки В лінією постійного тепловмісту повітря проводять пряму до перетину з лінією постійного кінцевого параметра процесу сушіння $t_k = 40\text{ }^\circ\text{C}$ та отримують точку С (див. рис. 3.4).

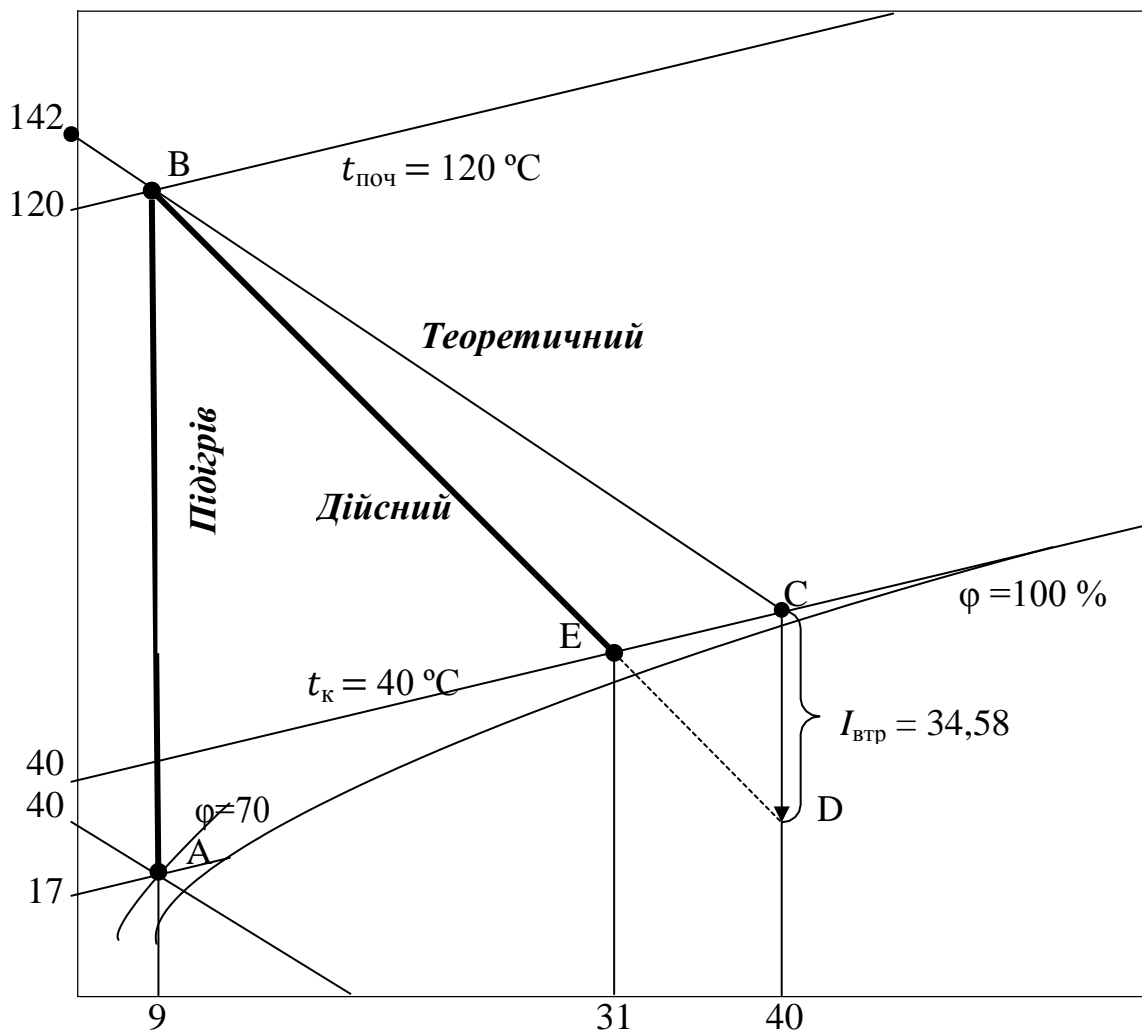


Рис. 3.4. Побудова процесу сушіння повітрям для розв'язання задачі

Провівши абсцису з точки С, визначають вологовміст наприкінці теоретичного процесу $d_2 = 40\text{ г/кг}$ сухого повітря. Після чого за формулою (3.8) визначають кількість вологи, що випаровується з матеріалу, з урахуванням наданої продуктивності сушарки $P_c = 700\text{ кг/год}$:

$$n = 700 \cdot \frac{20 - 6}{100 - 20} = 123\text{ кг/год.}$$

Тоді витрата повітря для теоретичного процесу сушіння (за формулою 3.9) становитиме:

$$G_{\text{теор}} = \frac{1000 \cdot 123}{40 - 9} = 3\,968 \text{ кг сухого повітря/год.}$$

Для побудови дійсного процесу сушіння потрібно знати величину зміни тепловмісту повітря наприкінці процесу сушіння. Ця величина має вигляд відрізка CD на діаграмі. Для знаходження допоміжної точки D необхідно розрахувати витрати тепла на нагрів матеріалу, що висушується, та транспортуючих пристроїв, а також втрати тепла у навколишнє середовище та через нещільність стінок сушарки.

Для розрахунку витрати тепла на нагрів виробів, що висушуються, необхідно попередньо розрахувати теплоємність висушених виробів за їх кінцевої вологості $w_k = 6\%$. Для цього з табл. 3.3 для будівельної цегли обирають $c_c = 0,921 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{°C)}$ та за формулою (3.12) отримують:

$$c_m = 0,921 \cdot \frac{100 - 6}{100} + \frac{4,2 \cdot 6}{100} = 1,118 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{°C)}.$$

Тоді витрата тепла на нагрів виробів, що висушуються, за формулою (3.11) становитиме:

$$q_m = 700 \cdot 1,118 \cdot (50 - 10) = 31\,304 \text{ кДж/год.}$$

Слід звернути увагу на те, що у наведеному прикладі у формулі (3.11) $t_k = 50 \text{ °C}$ (за руху повітря та вагонеток з виробами протитечією), а $t_{\text{поч}} = 10 \text{ °C}$. Проте в подібних розрахунках значення $t_{\text{поч}}$ може бути прийнятим більшим або нижчим за $t_{\text{пов}}$, якщо воно не обумовлене конкретним режимом сушіння.

Витрата тепла на нагрів транспортуючих пристроїв (вагонеток) розраховується за формулою (3.13), проте для спрощення розв'язання задачі, значення $q_{\text{тр}}$ у даному розрахунку може бути прийнятим з досвіду експлуатації діючих сушарок безперервної дії у межах 20000–27000 кДж/год, а саме $q_{\text{тр}} = 20000 \text{ кДж/год}$.

Для розрахунку втрати тепла крізь стінки сушарки у навколишнє середовище приймають такі параметри: значення коефіцієнта теплопередачі $K = 2,0 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{°C)}$; середню температуру внутрішньої поверхні сушильної камери $t_{\text{вн}} = 120 + 40/2 = 80 \text{ °C}$ та навколишнього середовища $t_{\text{нс}} = t_{\text{пов}} = 17 \text{ °C}$; поверхню тепловіддачі стінок сушарки (як і у випадку з $q_{\text{тр}}$, обирають з досвіду експлуатації тунельних сушарок), $F = 175 \text{ м}^2$.

За формулою (3.14) втрата тепла крізь стінки сушарки у навколишнє середовище становитиме:

$$q_{\text{нс}} = 3,6 \cdot 2,0 \cdot (80 - 17) \cdot 175 = 79380 \text{ кДж/год.}$$

Втрати тепла через нещільності стін сушарки становитимуть:

$$q_{\text{нещ}} = 0,05 \cdot (31304 + 20000 + 79380) = 6534 \text{ кДж/год.}$$

Сума втрат тепла у сушарці за формулою (3.10) буде дорівнювати:

$$q_{\text{втр}} = 31304 + 20000 + 79380 + 6534 = 137218 \text{ кДж/год.}$$

Після цього за формулою (3.15) знаходять величину зменшення тепловмісту повітря наприкінці теоретичного процесу сушіння (тобто відносно точки С).

$$I_{\text{втр}} = \frac{137218}{3968} = 34,58 \text{ кДж/кг сухого повітря.}$$

На $I - d$ діаграмі відкладають величину $I_{\text{втр}}$ від точки С донизу та одержують допоміжну точку D (див. рис. 3.4). Поєднують точки В і D, та у місці перетину прямої BD з лінією кінцевої температури процесу сушіння $t_k = 40^\circ\text{C}$, знаходять на діаграмі точку E. Дійсний процес сушіння зображений прямою BE.

Далі, за допомогою абсциси з точки E, знаходять величину кінцевого вологовмісту $d_k = 31 \text{ г/кг}$ сухого повітря, і за формулою (3.9) визначають дійсну витрату повітря:

$$G_{\text{пов}} = \frac{1000 \cdot 123}{31 - 9} = 5591 \text{ кг сухого повітря/год.}$$

Витрату тепла для сушіння знаходять за формулою (3.7):

$$Q = 5591 \cdot (142 - 40) - 4,2 \cdot 123 \cdot 10 = 565116 \text{ кДж/год.}$$

Задачі для практики

Відповідно до отриманого з табл. 3.4 варіанта завдання, за допомогою табл. 3.3 та $I - d$ діаграми на рис. 3.1 побудуйте на $I - d$ діаграмі теоретичний та дійсний процес сушіння, проведіть необхідні розрахунки та визначте витрати тепла та повітря для сушіння вказаного матеріалу або виробу.

Таблиця 3.4 – Параметри процесу сушіння деяких виробів підігрітим повітрям у сушарках безперервної дії

Номер задачі	Найменування виробів	Параметри сушіння								
		$t_{пов},$ °С	$\varphi_{пов},$ %	$t_{поч},$ °С	$t_{к},$ °С	$w_{поч},$ %	$w_{к},$ %	$P_{с},$ кг/ГОД	$F,$ м ²	$q_{тр},$ кДж/ГОД
1	Шамотна цегла	17	72	100	35	18	5	800	165	20000
2	Шамотна цегла	18	70	120	35	10	2	820	167	20700
3	Динасові вироби	19	70	200	50	7	2	900	170	22000
4	Блок з магнезиту	20	65	120	40	3	0,2	910	173	22500
5	Блок з доломіту	21	65	120	50	2,7	0,2	920	175	23000
6	Вироби з хромомagneзиту	22	60	110	45	3	0,2	870	168	23000
7	Будівельна цегла	23	55	120	30	20	5	890	170	21500
8	Плитки для підлоги	24	47	120	40	10	1,5	600	150	20000
9	Керамічні блоки	20	65	120	32	18	5	600	160	20000
10	Фарфор	20	65	120	35	24	2	500	140	21000
11	Санітарно-технічна кераміка	25	45	110	35	16	1	500	140	22000
12	Плитки лицювальні	23	45	120	40	8	0,5	500	145	20000
13	Електрофарфор	21	65	120	35	17	1	550	150	20500
14	Багатошамотні фасонні вироби	18	70	150	40	18	6	850	168	20700
15	Динасові вироби	25	47	170	40	6,5	1,5	920	175	23500

3.2.2. Процес сушіння сумішшю димових газів з повітрям

Теоретичний та дійсний процес сушіння сумішшю димових газів (продуктів згоряння) з повітрям будується на $I - d$ діаграмі аналогічно процесу сушіння підігрітим повітрям. Відміна полягає у тому, що замість процесу підігріву атмосферного повітря передбачається змішування повітря з димовими газами для розбавлення їх до необхідної початкової температури $t_{поч}$.

Проте якщо є відомими параметри суміші димових газів з повітрям, наприклад $d_{поч}$ або $I_{поч}$ за відомої або заданої температури $t_{поч}$, то побудування процесу сушіння починається з теоретичного процесу від точки В, як це зображено на рис. 3.5. Для отримання лінії змішування димових газів з повітрям, за параметрами атмосферного повітря знаходять точку А (див. п. 3.2.1), а потім за параметрами димових газів $t_{газ}$ та $d_{газ}$ точку В'', як показано на рис. 3.5.

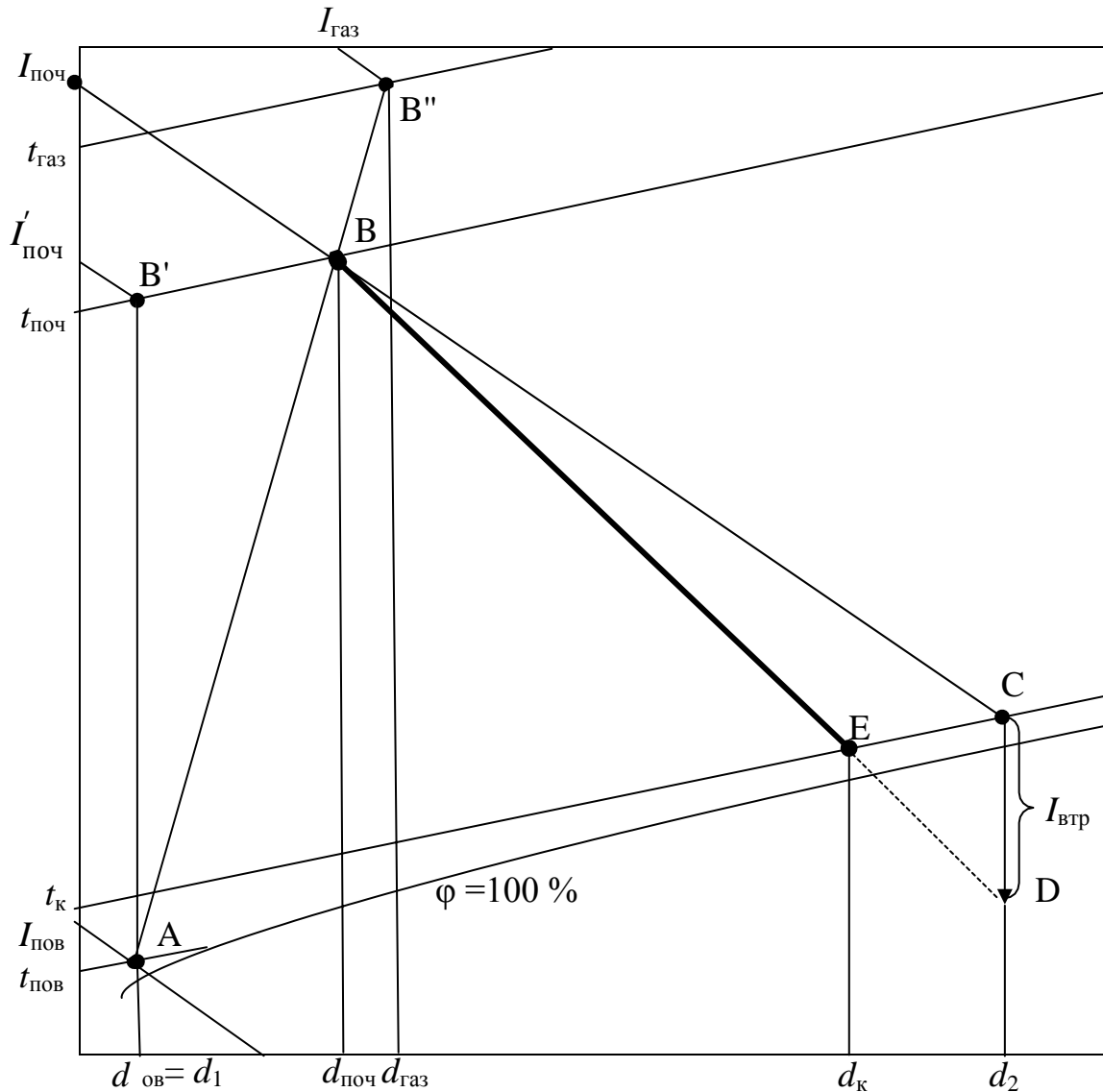


Рис. 3.5. Побудова на $I - d$ діаграмі процесу сушіння сумішшю димових газів з повітрям

При цьому точка В знаходиться перетином лінії змішування AB'' з лінією температури $t_{пoch}$. Теоретичний процес сушіння (рис. 3.5) поданий лінією BC , втрати тепловмісту – лінією CD , дійсний процес сушіння – лінією BE .

Витрата суміші димових газів з повітрям, яка потрапляє до сушарки, визначається за формулою (3.9), кг сухих газів/год:

$$G_{см} = \frac{1000 \cdot n}{d_k - d_{пoch}}.$$

Об'єм вологої суміші продуктів згоряння з повітрям, яка потрапляє до сушарки, визначається за формулою (3.16), м³/год:

$$V_{\text{см}} = \frac{1 + 0,001 \cdot d_{\text{поч}}}{\rho_0} \cdot G_{\text{см}}, \quad (3.16)$$

де ρ_0 – густина суміші, яка визначається за складом вологих продуктів згоряння за загального коефіцієнта витрати повітря; наближено можна прийняти $\rho_0 = 1,3 \text{ кг/м}^3$ (див. розділ 1, п. 1.8).

Об'єм вологих газів, що відходять з сушарки, буде дорівнювати за формулою (3.17), м³/год:

$$V_{\text{відх}} = V_{\text{см}} + V_{\text{вол.п}} = V_{\text{см}} + \frac{n}{0,804}. \quad (3.17)$$

Дійсний об'єм відхідних газів за їх температури t_k визначається за формулою (3.18), м³/год:

$$V_t = V_{\text{відх}} \cdot (1 + \beta \cdot t_k). \quad (3.18)$$

Точка В дає можливість отримати тепловміст $I_{\text{поч}}$ суміші з урахуванням тепловмісту водяної пари у продуктах згоряння. За однакової температури $t_{\text{поч}}$ тепловміст суміші буде більшим, ніж тепловміст повітря, що відповідає точці В' ($I_{\text{поч}} > I'_{\text{поч}}$). При визначенні витрати тепла для сушіння необхідно відрізнити величину $I_{\text{поч}}$, що враховує тепловміст водяної пари продуктів згоряння (точка В), та $I'_{\text{поч}}$ – без врахування тепловмісту водяної пари продуктів згоряння (точка В').

Витрату тепла для сушіння знаходять за формулою (3.7), кДж/год:

$$Q = G_{\text{см}} \cdot (I'_{\text{поч}} - I_{\text{пов}}) - 4,2 \cdot n \cdot t_m$$

Витрата палива за його нижчої теплоти згоряння Q_H^p (кДж/м³ або кДж/кг), з урахуванням коефіцієнта корисної дії паливоспалювального пристрою (топки) η , може бути знайдена за формулою (3.19), кг/год або м³/год:

$$X_{\text{п}} = \frac{Q}{Q_H^p \cdot \eta}. \quad (3.19)$$

Питома витрата тепла для сушіння визначається за формулою (3.20), кДж/кг вологи:

$$q_w = \frac{X_{\text{п}} \cdot Q_{\text{н}}^{\text{р}}}{n}. \quad (3.20)$$

Приклад розрахунку

Визначити витрати тепла та сушильного агента для сушіння глини у барабанній сушарці продуктивністю 10 т/год по висушеній глині від початкової відносної вологості $w_{\text{поч}} = 20\%$ до кінцевої $w_{\text{к}} = 6\%$. Сушіння відбувається топковими газами, розбавленими атмосферним повітрям у змішувальній камері на вході до барабана. Спалюється мазут марки ММ40. Початкова температура сушіння – 800 °С, кінцева – 110 °С. Початкові параметри атмосферного повітря: відносна вологість 70 %, температура 20 °С.

Як і у випадку процесу сушіння підігрітим повітрям, розв'язання задачі слід починати з побудування на $I-d$ діаграмі теоретичного процесу сушіння. Для цього необхідно знайти на діаграмі точку В, від якої починається теоретичний процес. Але для її знаходження потрібно знати початкові параметри процесу сушіння (параметри суміші димових газів з повітрям) $d_{\text{поч}}$ або $I_{\text{поч}}$, які за умовами задачі є невідомими.

Початковий вологовміст $d_{\text{поч}}$ суміші димових газів з повітрям можна визначити або провівши розрахунки необхідних параметрів процесу горіння наданого виду палива, або скориставшись даними попередньо проведених розрахунків.

У наведеному прикладі з розрахунку процесу горіння мазуту марки ММ40 обирають такі параметри:

- теплотворність мазуту $Q_{\text{н}}^{\text{р}} = 39\,739$ кДж/кг;
- теоретична витрата сухого повітря для горіння $L_0 = 10,40$ м³/кг;
- теоретична витрата атмосферного повітря: $L_0^{\text{вл}} = 10,57$ м³/кг;
- дійсна витрата атмосферного повітря за $\alpha = 1,2$ $L_{\alpha}^{\text{вл}} = 12,68$ м³/кг;
- склад та об'єми продуктів згоряння за $\alpha = 1,2$, у %: CO₂ – 11,8; N₂ – 74,1; O₂ – 3,3; H₂O – 10,8; у м³/кг: CO₂ – 1,573; N₂ – 9,862; O₂ – 0,437; H₂O – 1,477.

Тепловміст (ентальпія) продуктів згоряння при спалюванні мазуту з атмосферним повітрям (без урахування підігріву мазуту та повітря) за $\alpha = 1,2$, за формулою (1.35) становитиме:

$$I_{\text{заг}} = \frac{Q_{\text{н}}^{\text{р}}}{V_{\alpha}} = \frac{39739}{13,35} = 2977 \text{ кДж/м}^3.$$

За умовами задачі початкова температура газів на вході до сушильного барабана $t_{\text{поч}} = 800 \text{ }^\circ\text{C}$. Для отримання такої температури димові гази, утворені при згорянні палива, необхідно розбавити атмосферним повітрям у потрібній кількості.

Для визначення кількості атмосферного повітря, необхідного для змішування, має бути складене рівняння теплового балансу, в якому кількість повітря за температури $t_{\text{пов}} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ для змішування позначають x ($\text{м}^3/\text{кг}$ палива). ККД топки можна прийняти $\eta = 0,9$.

$$I_{\text{заг}} \cdot \eta + \frac{L_{\text{вкл}}}{V_{\alpha}} + x \cdot I_{20}^{\text{пов}} = I_{800}^{\text{д.г}} + \frac{x}{V_{\alpha}} \cdot I_{800}^{\text{пов}}$$

де $I_{20}^{\text{пов}} = c_{\text{пов}} \cdot t_{\text{пов}} = 1,2971 \cdot 20 = 26 \text{ кДж/м}^3$ – ентальпія повітря за температури $20 \text{ }^\circ\text{C}$ ($c_{\text{пов}}$ див. табл. 1.12); $I_{800}^{\text{пов}} = 1110,0 \text{ кДж/м}^3$ – ентальпія повітря за температури $800 \text{ }^\circ\text{C}$, яка наведена у табл. 3.5; I_{800} – ентальпія димових газів за температури $800 \text{ }^\circ\text{C}$, розраховується за формулою (1.36):

$$I_{800}^{\text{д.г}} = 0,01 \cdot \sum_{i=0}^n (I_{y_i} \cdot y_i) = 1\,193,9 \text{ кДж/м}^3,$$

де I_{y_i} – ентальпії продуктів згоряння мазуту CO_2 , N_2 , O_2 та H_2O за температури $800 \text{ }^\circ\text{C}$, кДж/м^3 (див. табл. 3.5); y_i – відсотковий склад продуктів згоряння мазуту (за умовами задачі), %.

Отримують числовий запис рівняння теплового балансу:

$$2\,977 \cdot 0,9 + \frac{12,68 + x}{13,35} \cdot 26 = 1\,193,9 + \frac{x}{13,35} \cdot 1\,110.$$

Розв'язавши рівняння теплового балансу, отримують кількість атмосферного повітря необхідного для змішування $x = 18,59 \text{ м}^3/\text{кг}$.

Розраховують загальну кількість повітря, що витрачається на горіння та розбавлення димових газів:

$$L_{\alpha}^{\text{заг}} = 12,68 + 18,59 = 31,27 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Тоді загальний коефіцієнт витрати повітря становитиме:

$$\alpha_{\text{заг}} \frac{L_{\alpha}^{\text{заг}}}{L_0^{\text{вл}}} = \frac{31,27}{10,57} = 2,96.$$

Таблиця 3.5 – Ентальпія повітря та деяких газів, кДж/м³

Температура, °С	CO ₂	SO ₂	H ₂ O	N ₂	O ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀	C ₅ H ₁₂	Сухе повітря	Вологе повітря, $d_{\text{пов}} = 10 \text{ г/кг сух. пов.}$
100	170,0	181,3	150,7	129,8	131,9	164,1	249,5	350,9	470,6	583,7	130,05	130,2
200	357,6	377,7	304,4	260,0	267,1	351,7	554,8	793,0	1051,4	1303,0	261,52	262,1
300	558,9	586,6	462,7	391,9	407,0	566,1	913,2	1310,9	1731,7	2140,8	395,31	397,3
400	772,1	807,2	626,4	526,7	551,0	806,4	1323,5	1903,8	2506,8	3096,3	531,76	535,9
500	994,4	1034,2	795,1	664,1	699,2	1070,2	1776,5	2546,9	3344,6	4128,4	671,4	671,8
600	1224,7	1268,7	968,9	804,3	850,0	1356,6	2266,8	3259,2	4269,1	5269,8	814,2	816,5
700	1462,1	1506,5	1148,9	947,5	1004,0	1663,9	2790,6	4006,5	5239,6	6462,2	959,84	963,0
800	1704,9	1745,1	1334,4	1093,6	1159,8	1995,5	3345,0	4790,8	6246,6	7700,3	1107,68	1110,0
900	1952,4	1993,4	1526,2	1241,9	1318,1	2342,2	3925,7	5608,5	7303,0	8992,8	1257,84	1262,4
1000	2203,6	2235,9	1722,9	1391,7	1477,6	2699,4	4529,5	6461,4	8404,1	10344,8	1409,8	1416,5
1100	2458,6	2487,1	1925,2	1543,7	1638,4	3065,3	5152,5	7345,7	9546,8	11747,5	1564,09	1568,0
1200	2716,5	2733,3	2132,4	1697,4	1800,8	3435,8	5790,6	8258,0	10726,3	13196,2	1719,36	1728,4
1300	2976,9	2970,5	2343,9	1852,7	1963,7	–	–	–	–	–	1876,81	1882,5
1400	3239,1	3241	2559,1	2008,9	2128,2	–	–	–	–	–	2035,18	2041,2
1500	3503,3	3495	2779,3	2166,3	2294,5	–	–	–	–	–	2194,35	2200,3
1600	3769,1	3747	3002,1	2324,6	2460,7	–	–	–	–	–	2354,72	2363,6
1700	4036,7	3995	3229,4	2484,1	2628,6	–	–	–	–	–	2515,49	2523,1
1800	4305,1	4244	3458,5	2643,7	2797,7	–	–	–	–	–	2676,96	2689,7
1900	4574,3	4489,7	3690,4	2804,4	2967,3	–	–	–	–	–	2840,12	2849,2
2000	4844,4	4740	3925,7	2965,2	3138,6	–	–	–	–	–	3003	3010,9
2100	5115,7	4989,6	4163,5	3127,7	3309,4	–	–	–	–	–	3167,22	3175,5
2200	5387,0	5238,2	4402,2	3289,3	3482,7	–	–	–	–	–	3330,8	3339,1

Після цього за формулою (1.31) можна визначити вологовміст димових газів, розбавлених атмосферним повітрям, тобто початковий вологовміст $d_{\text{поч}}$, за допомогою якого на $I - d$ діаграмі отримують точку В – початку теоретичного процесу сушіння.

Для цього необхідно за нового значення $\alpha = 2,96$ перерахувати об'єм водяної пари $V_{\text{H}_2\text{O}}$, який збільшується за рахунок додаткового введення водяної пари з атмосферним повітрям; V_{N_2} та V_{O_2} , які залежать від коефіцієнта витрати повітря. Об'єм V_{CO_2} не залежить від коефіцієнта витрати повітря, тому перераховувати його не потрібно. Перерахунок відповідних об'ємів проводять за формулами (1.23), (1.27), (1.28), користуючись табл. 1.3 та 1.5 (для визначення вмісту водню H^p та азоту N^p у робочій масі мазуту ММ40). Крім того, припускають, що розпилення мазуту відбувається підігрітим повітрям, що не потребує витрати пари, тобто $G_{\phi} = 0$.

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = 0,0016 \cdot 10 \cdot 2,96 \cdot 10,4 + 0,112 \cdot 10,8 + 0,0124 \cdot 3 = 1,74 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$V_{\text{N}_2} = 0,79 \cdot 2,96 \cdot 10,4 + 0,008 \cdot 0,435 = 24,32 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$V_{\text{O}_2} = 0,21 \cdot (2,96 - 1) \cdot 10,4 = 4,28 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Тоді $d_{\text{поч}}$ за формулою (1.31) складатиме:

$$d_{\text{поч}} = \frac{804 \cdot 1,74}{1,964 \cdot 1,573 + 1,25 \cdot 24,32 + 1,428 \cdot 4,28} = 35,3 \text{ г/кг сухих газів}.$$

Далі за відомими початковими параметрами сушильного агента $t_{\text{поч}} = 800 \text{ }^\circ\text{C}$ та $d_{\text{поч}} = 35,3 \text{ г/кг}$ сухих газів, на $I - d$ діаграмі знаходять точку В – початок процесу сушіння, як показано на рис. 3.6.

Теоретичний процес сушіння зображують лінією ВС. Параметрами точки С є: початковий тепловміст $I_{\text{поч}} = 1015 \text{ кДж/кг}$ сухих газів, кінцева температура газів $t_{\text{к}} = 110 \text{ }^\circ\text{C}$ та кінцевий вологовміст теоретичного процесу сушіння $d_2 = 317 \text{ г/кг}$ сухих газів.

За формулою (3.8) визначають кількість вологи, що випаровується з глини під час сушіння з урахуванням наданої продуктивності сушарки $P_c = 10000 \text{ кг/год}$:

$$n = 10000 \cdot \frac{20 - 6}{100 - 20} = 1750 \text{ кг/год}.$$

Тоді витрата сухих газів для теоретичного процесу сушіння (за формулою 3.9) становитиме:

$$G_{\text{Газ}}^{\text{теор}} = \frac{1000 \cdot 1750}{317 - 35,3} = 6212 \text{ кг сухих газів/год.}$$

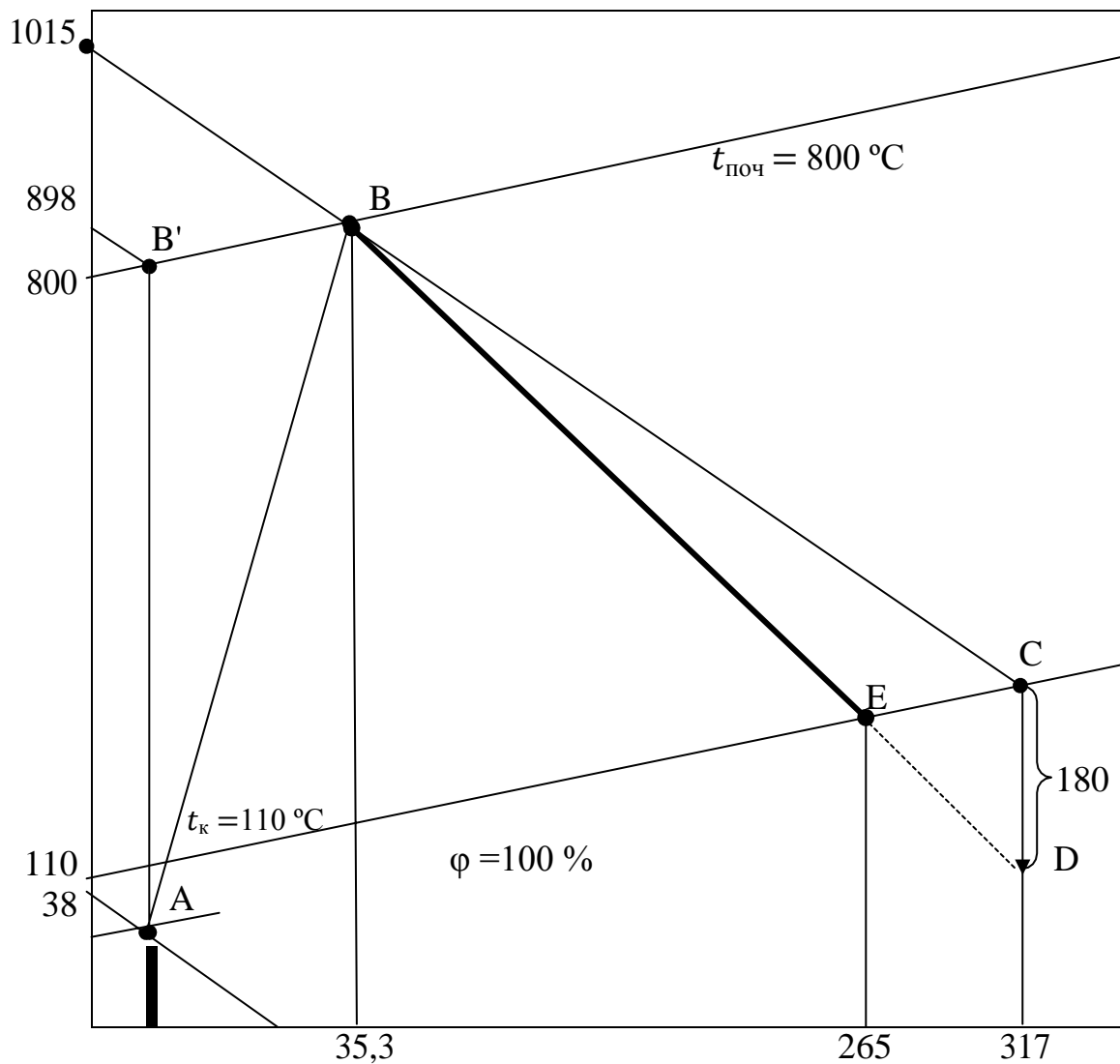


Рис. 3.6. Побудова на $I - d$ діаграмі процесу сушіння сумішшю димових газів з повітрям для розв'язання задачі

Дійсний процес сушіння буде супроводжуватись втратами тепловмісту сушильного агента, які обумовлені витратою тепла у барабанній сушарці на нагрів матеріалу, що висушується, а також втратою тепла у навколишнє середовище через стінки сушильного барабана.

Для розрахунку витрати тепла на нагрів глини, що висушується, необхідно попередньо розрахувати теплоємність висушеної глини за її кінцевої вологості $w_k = 6\%$. Для цього з табл. 3.3 для глини обирають $c_c = 0,921$ кДж/(кг·°С) та за формулою (3.12) отримують:

$$c_m = 0,921 \cdot \frac{100 - 6}{100} + \frac{4,2 \cdot 6}{100} = 1,118 \text{ кДж/(кг·°С)}.$$

Приймають, що кінцева температура глини при виході з сушарки t_k та початкова температура глини, що надходить у сушарку $t_{\text{поч}}$ відповідно дорівнюють 90 °С та 10 °С. Тоді витрата тепла на нагрів глини, що висушується за формулою (3.11) становитиме:

$$q_m = 10000 \cdot 1,118 \cdot (90 - 10) = 894400 \text{ кДж/год.}$$

Для розрахунку втрати тепла крізь стінки сушильного барабана у навколишнє середовище беруть: значення коефіцієнта теплопередачі $K = 3,8$ Вт/(м²·°С); середню температуру навколишнього середовища $t_{\text{нс}} = t_{\text{пов}} = 20$ °С; поверхню тепловіддачі стінок сушарки обирають з досвіду експлуатації сушильних барабанів $F = 65$ м², проте якщо є відомі середній діаметр та довжина барабана, F розраховується як площа циліндричної поверхні.

Середня температура внутрішньої поверхні сушильної камери $t_{\text{вн}}$, яка у цьому випадку відповідає середній температурі газів всередині барабана, має бути розрахована за формулою (3.21), °С:

$$t_{\text{вн}} = t_{\text{сер.газ}} = \frac{(t_{\text{поч.газ}} - t_{\text{поч.м}}) - (t_{\text{к.газ}} - t_{\text{к.м}})}{\ln \frac{t_{\text{поч.газ}} - t_{\text{поч.м}}}{t_{\text{к.газ}} - t_{\text{к.м}}}} + t_{\text{сер.м}}, \quad (3.21)$$

де $t_{\text{сер.м}}$ – середня температура глини, яка розраховується за такою формулою, °С:

$$t_{\text{сер.м}} = t_{\text{поч.м}} + 2/3 \cdot (t_{\text{к.м}} - t_{\text{поч.м}}) = 10 + 2/3 \cdot (90 - 10) = 63 \text{ °С.}$$

Тоді середня температура внутрішньої поверхні барабана становитиме:

$$t_{\text{вн}} = \frac{(800 - 10) - (110 - 90)}{\ln \frac{790}{20}} + 63 = 272 \text{ °С.}$$

За формулою (3.14) втрата тепла крізь стінки сушильного барабана у навколишнє середовище становитиме:

$$q_{nc} = 3,6 \cdot 3,8 \cdot (272 - 20) \cdot 65 = 224078 \text{ кДж/год.}$$

Сума втрат тепла у сушарці за формулою (3.10) буде дорівнювати:

$$q_{втр} = 894400 + 224078 = 1118478 \text{ кДж/год.}$$

Після цього за формулою (3.15) знаходять величину зменшення тепловмісту сушильного агента наприкінці теоретичного процесу сушіння (тобто відносно точки С).

$$I_{втр} = \frac{1118478}{6212} = 180 \text{ кДж/кг сухих газів.}$$

На $I - d$ діаграмі відкладають величину $I_{втр}$ від точки С донизу та одержують допоміжну точку D (див. рис. 3.6). Поєднують точки В і D, та у місці перетину прямої BD з лінією кінцевої температури процесу сушіння $t_k = 110 \text{ }^\circ\text{C}$, знаходять на діаграмі точку E. Дійсний процес сушіння зображений прямою BE.

Далі за допомогою абсциси з точки E знаходять величину кінцевого вологовмісту $d_k = 265 \text{ г/кг сухих газів}$, і за формулою (3.9) визначають дійсну витрату суміші димових газів з повітрям для сушіння:

$$G_{см} = \frac{1000 \cdot 1750}{265 - 35,3} = 7619 \text{ кг сухих газів/год.}$$

Для визначення витрати тепла для сушіння за $I - d$ діаграмою (див. рис. 3.6) знаходять $I'_{пов} = 898 \text{ кДж/кг сухого повітря}$ – початковий тепловміст підігрітого димовими газами до $800 \text{ }^\circ\text{C}$ повітря (для точки В'), та $I_{пов} = 38 \text{ кДж/кг сухого повітря}$ – початковий тепловміст холодного повітря (відносно точки А); t_m – температуру матеріалу (глини) прийняли $10 \text{ }^\circ\text{C}$. Тоді витрата тепла для сушіння за формулою (3.7) становитиме:

$$Q = 7619 \cdot (898 - 38) - 4,2 \cdot 1750 \cdot 10 = 6\,478\,840 \text{ кДж/год.}$$

Витрата мазуту за його нижчої теплоти згоряння $Q_H^p = 39\,739 \text{ кДж/кг}$ з урахуванням коефіцієнта корисної дії топки $\eta = 0,9$, за формулою (3.19) становитиме:

$$X_{\text{п}} = \frac{6478840}{39739 \cdot 0,9} = 181 \text{ кг/год.}$$

Питома витрата тепла для сушіння, віднесена до 1 кг випареної води, за формулою (3.20) дорівнюватиме:

$$q_{\text{w}} = \frac{181 \cdot 39739}{1750} = 4110 \text{ кДж/кг води.}$$

Далі можна визначити витрату повітря, необхідного для горіння:

$$V_{\text{пов}} = L^{\text{вол}} \cdot X_{\text{п}} = 12,68 \cdot 181 = 2295 \text{ м}^3/\text{год.}$$

Витрата повітря, необхідного для розбавлення димових газів у камері змішування, становитиме:

$$V'_{\text{пов}} = \alpha_{\text{заг}} \cdot L^{\text{вол}} \cdot X_{\text{п}} - V_{\text{пов}} = 2,96 \cdot 10,57 \cdot 181 - 2295 = 3368 \text{ м}^3/\text{год.}$$

Об'єм вологої суміші продуктів згорання з повітрям, яка потрапляє до сушильного барабана, визначають за формулою (3.16):

$$V_{\text{см}} = \frac{1+0,001 \cdot 35,3}{1,3} \cdot 7619 = 6068 \text{ м}^3/\text{год.}$$

Об'єм вологих газів, що відходять з сушильного барабана, за формулою (3.17) буде дорівнювати:

$$V_{\text{відх}} = 6068 + \frac{1750}{0,804} = 8245 \text{ м}^3/\text{год.}$$

Дійсний об'єм відхідних газів за температури $t_{\text{к}} = 110 \text{ }^{\circ}\text{C}$ визначають за формулою (3.18):

$$V_t = 8245 \cdot \left(1 + \frac{110}{273}\right) = 11567 \text{ м}^3/\text{год.}$$

Задачі для практики

Скористайтеся табл. 3.3, 3.6 та $I-d$ діаграмою на рис. 3.2 для проведення необхідних побудовань і розрахунків та визначте:

1. Витрати тепла, сушильного агента та палива для сушіння вказаного матеріалу сумішшю димових газів з атмосферним повітрям. Параметри процесу горіння природного газу:

- склад сухої маси газу, %: $\text{CH}_4 - 93,2$; $\text{C}_2\text{H}_6 - 4,4$; $\text{C}_3\text{H}_8 - 0,8$; $\text{C}_4\text{H}_{10} - 0,6$; $\text{C}_5\text{H}_{12} - 0,3$; $\text{CO}_2 - 0,1$; $\text{N}_2 - 0,6$;
- теплотворність $Q_{\text{H}}^{\text{p}} = 37\,293$ кДж/м³;
- дійсна витрата атмосферного повітря за $\alpha = 1,2$, $L_{\alpha} = 12,86$ м³/м³;
- об'єми продуктів згорання за $\alpha = 1,2$, м³/м³: $\text{CO}_2 - 1,06$; $\text{N}_2 - 10,17$; $\text{O}_2 - 0,62$; $\text{H}_2\text{O} - 2,26$.

2. Витрати тепла, сушильного агента та палива для сушіння вказаного матеріалу сумішшю димових газів з атмосферним повітрям. Параметри процесу горіння мазуту:

- склад горючої маси мазуту, %: $\text{C} - 87,2$; $\text{H} - 11,7$; $\text{S} - 0,5$; $\text{N}+\text{O} - 0,6$; вміст золи та вологи відповідно $- 0,1$ % та 2 %;
- теплотворність $Q_{\text{H}}^{\text{p}} = 40\,709$ кДж/кг;
- дійсна витрата атмосферного повітря за $\alpha = 1,2$, $L_{\alpha} = 14,88$ м³/кг;
- об'єми продуктів згорання за $\alpha = 1,2$, м³/кг: $\text{CO}_2 - 1,59$; $\text{N}_2 - 11,76$; $\text{O}_2 - 0,89$; $\text{H}_2\text{O} - 1,86$.

3. Витрати тепла, сушильного агента та палива для сушіння вказаного матеріалу сумішшю димових газів з атмосферним повітрям. Параметри процесу горіння природного газу:

- склад сухої маси газу, %: $\text{CH}_4 - 98,0$; $\text{C}_2\text{H}_6 - 0,3$; $\text{C}_3\text{H}_8 - 0,1$; $\text{C}_4\text{H}_{10} - 0,1$; $\text{CO}_2 - 0,3$; $\text{N}_2 - 1,2$;
- теплотворність $Q_{\text{H}}^{\text{p}} = 34\,989$ кДж/м³;
- дійсна витрата атмосферного повітря за $\alpha = 1,2$, $L_{\alpha} = 12,22$ м³/м³;
- об'єми продуктів згорання за $\alpha = 1,2$, м³/м³: $\text{CO}_2 - 0,98$; $\text{N}_2 - 9,66$; $\text{O}_2 - 0,59$; $\text{H}_2\text{O} - 2,16$.

4. Витрати тепла, сушильного агента та палива для сушіння вказаного матеріалу сумішшю димових газів з атмосферним повітрям. Параметри процесу горіння мазуту:

- склад горючої маси мазуту, %: $\text{C} - 87,4$; $\text{H} - 11,2$; $\text{S} - 0,5$; $\text{N}+\text{O} - 0,9$; вміст золи та вологи відповідно $- 0,2$ % та 3 %;
- теплотворність $Q_{\text{H}}^{\text{p}} = 39\,778$ кДж/кг;
- дійсна витрата атмосферного повітря за $\alpha = 1,2$, $L_{\alpha} = 12,47$ м³/кг;
- об'єми продуктів згорання за $\alpha = 1,2$, м³/кг: $\text{CO}_2 - 1,58$; $\text{N}_2 - 9,86$; $\text{O}_2 - 0,44$; $\text{H}_2\text{O} - 1,88$.

5. Витрати тепла, сушильного агента та палива для сушіння вказаного матеріалу сумішшю димових газів з атмосферним повітрям. Параметри процесу горіння природного газу:

- склад сухої маси газу, %: $\text{CH}_4 - 95,6$; $\text{C}_2\text{H}_6 - 2,7$; $\text{C}_3\text{H}_8 - 0,3$; $\text{C}_4\text{H}_{10} - 0,3$; $\text{CO}_2 - 0,1$; $\text{N}_2 - 1,0$;

- теплотворність $Q_H^p = 35\,846$ кДж/м³;
- дійсна витрата атмосферного повітря за $\alpha = 1,2$, $L_\alpha = 12,37$ м³/м³;
- об'єми продуктів згоряння за $\alpha = 1,2$, м³/м³: CO₂ – 1,01; N₂ – 9,78; O₂ – 0,59; H₂O – 2,19.

6. Витрати тепла, сушильного агента та палива для сушіння вказаного матеріалу сумішшю димових газів з атмосферним повітрям. Параметри процесу горіння мазуту:

- склад горючої маси мазуту, %: С – 87,6; Н – 10,7; S – 0,7; N+O – 1,0; вміст золи та вологи відповідно – 0,2 % та 3 %;
- теплотворність $Q_H^p = 39\,361$ кДж/кг;
- дійсна витрата атмосферного повітря за $\alpha = 1,2$, $L_\alpha = 13,37$ м³/кг;
- об'єми продуктів згоряння за $\alpha = 1,2$, м³/кг: CO₂ – 1,58; N₂ – 10,57; O₂ – 0,65; H₂O – 1,74.

7. Витрати тепла, сушильного агента та палива для сушіння вказаного матеріалу сумішшю димових газів з атмосферним повітрям. Параметри процесу горіння природного газу:

- склад сухої маси газу, %: CH₄ – 97,9; C₂H₆ – 0,5; C₃H₈ – 0,2; C₄H₁₀ – 0,1; CO₂ – 0,1; N₂ – 1,2;
- теплотворність $Q_H^p = 34\,955$ кДж/м³;
- дійсна витрата атмосферного повітря за $\alpha = 1,2$, $L_\alpha = 11,15$ м³/м³;
- об'єми продуктів згоряння за $\alpha = 1,2$, м³/м³: CO₂ – 0,98; N₂ – 8,82; O₂ – 0,39; H₂O – 2,14.

8. Витрати тепла, сушильного агента та палива для сушіння вказаного матеріалу сумішшю димових газів з атмосферним повітрям. Параметри процесу горіння мазуту:

- склад горючої маси мазуту, %: С – 87,6; Н – 10,5; S – 0,9; N+O – 1,0; вміст золи та вологи відповідно – 0,3 % та 4 %;
- теплотворність $Q_H^p = 38\,713$ кДж/кг;
- дійсна витрата атмосферного повітря за $\alpha = 1,2$, $L_\alpha = 13,15$ м³/кг;
- об'єми продуктів згоряння за $\alpha = 1,2$, м³/кг: CO₂ – 1,56; N₂ – 9,61; O₂ – 0,43; H₂O – 1,66.

9. Витрати тепла, сушильного агента та палива для сушіння вказаного матеріалу сумішшю димових газів з атмосферним повітрям. Параметри процесу горіння природного газу:

- склад сухої маси газу, %: CH₄ – 94,0; C₂H₆ – 1,2; C₃H₈ – 0,7; C₄H₁₀ – 0,4; C₅H₁₂ – 0,2; CO₂ – 0,2; N₂ – 3,3;
- теплотворність $Q_H^p = 35\,107$ кДж/м³;
- дійсна витрата атмосферного повітря за $\alpha = 1,2$, $L_\alpha = 11,19$ м³/м³;
- об'єми продуктів згоряння за $\alpha = 1,2$, м³/м³: CO₂ – 0,99; N₂ – 8,87; O₂ – 0,39; H₂O – 2,14.

Таблиця 3.6 – Параметри процесу сушіння сумішшю димових газів з атмосферним повітрям деяких матеріалів

Номер задачі	Найменування матеріалу	Параметри сушіння								
		$t_{пов},$ °C	$\varphi_{пов},$ %	$t_{поч},$ °C	$t_{к},$ °C	$w_{поч},$ %	$w_{к},$ %	$P_{с},$ кг/год	$F,$ м ²	η
1	Глина	17	72	600	80	20	4	8000	70	0,9
2	Глина	18	70	700	90	23	5	9000	75	0,85
3	Вогнетривка глина	19	70	800	80	10	1	8000	80	0,85
4	Шлак доменний	20	65	600	100	20	0,3	9500	72	0,8
5	Вогнетривка глина	21	65	800	75	9	0,5	8500	73	0,85
6	Шлак доменний	22	60	750	110	20	1	10000	65	0,9
7	Вапняк	22	60	800	120	12	1	11000	75	0,8
8	Вапняк	23	55	800	110	10	0,8	9000	80	0,85
9	Каолін	20	65	800	100	30	2	8000	70	0,9
10	Глина	17	70	350	70	18	7	15000	66	0,9
11	Каолін	21	65	800	90	25	1	8500	73	0,9
12	Пісок	25	45	800	100	10	0,3	9500	75	0,8
13	Крейда	19	65	800	100	12	1	9000	72	0,85
14	Пісок	17	70	350	80	18	3	12000	65	0,9
15	Антрацит	25	47	380	150	14	5	10000	60	0,8

10. Витрати тепла, сушильного агента та палива для сушіння вказаного матеріалу сумішшю димових газів з атмосферним повітрям. Параметри процесу горіння мазуту:

- склад горючої маси мазуту, %: С – 87,6; Н – 10,5; S – 0,9; N+O – 1,0; вміст золи та вологи відповідно – 0,3 % та 4 %;
- теплотворність $Q_H^p = 38\,711$ кДж/кг;
- дійсна витрата атмосферного повітря за $\alpha = 1,2$, $L_\alpha = 13,17$ м³/кг;
- об'єми продуктів згоряння за $\alpha = 1,2$, м³/кг: CO₂ – 1,56; N₂ – 10,41; O₂ – 0,64; H₂O – 1,84.

11. Витрати тепла, сушильного агента та палива для сушіння вказаного матеріалу сумішшю димових газів з атмосферним повітрям. Параметри процесу горіння природного газу:

- склад сухої маси газу, %: CH₄ – 85,9; C₂H₆ – 3,1; C₃H₈ – 1,0; C₄H₁₀ – 0,4; C₅H₁₂ – 0,1; CO₂ – 0,1; N₂ – 9,4;
- теплотворність $Q_H^p = 33\,748$ кДж/м³;
- дійсна витрата атмосферного повітря за $\alpha = 1,2$, $L_\alpha = 11,64$ м³/м³;

- об'єми продуктів згоряння за $\alpha = 1,2$, $\text{м}^3/\text{м}^3$: $\text{CO}_2 - 0,96$; $\text{N}_2 - 9,29$; $\text{O}_2 - 0,56$; $\text{H}_2\text{O} - 2,05$.

12. Витрати тепла, сушильного агента та палива для сушіння вказаного матеріалу сумішшю димових газів з атмосферним повітрям. Параметри процесу горіння мазуту:

- склад горючої маси мазуту, %: $\text{C} - 85,0$; $\text{H} - 11,6$; $\text{S} - 2,9$; $\text{N}+\text{O} - 0,5$; вміст золи та вологи відповідно $- 0,2\%$ та 2% ;
- теплотворність $Q_{\text{H}}^{\text{p}} = 39\,845$ кДж/кг;
- дійсна витрата атмосферного повітря за $\alpha = 1,2$, $L_{\alpha} = 13,62$ $\text{м}^3/\text{кг}$;
- об'єми продуктів згоряння за $\alpha = 1,2$, $\text{м}^3/\text{кг}$: $\text{CO}_2 - 1,57$; $\text{N}_2 - 10,76$; $\text{O}_2 - 0,66$; $\text{H}_2\text{O} - 1,97$.

13. Витрати тепла, сушильного агента та палива для сушіння вказаного матеріалу сумішшю димових газів з атмосферним повітрям. Параметри процесу горіння природного газу:

- склад сухої маси газу, %: $\text{CH}_4 - 87,1$; $\text{C}_2\text{H}_6 - 3,2$; $\text{C}_3\text{H}_8 - 1,2$; $\text{C}_4\text{H}_{10} - 0,3$; $\text{C}_5\text{H}_{12} - 0,3$; $\text{CO}_2 - 1,8$; $\text{N}_2 - 6,1$;
- теплотворність $Q_{\text{H}}^{\text{p}} = 34\,060$ кДж/м³;
- дійсна витрата атмосферного повітря за $\alpha = 1,2$, $L_{\alpha} = 10,85$ $\text{м}^3/\text{м}^3$;
- об'єми продуктів згоряння за $\alpha = 1,2$, $\text{м}^3/\text{м}^3$: $\text{CO}_2 - 0,98$; $\text{N}_2 - 8,63$; $\text{O}_2 - 0,38$; $\text{H}_2\text{O} - 2,06$.

14. Витрати тепла, сушильного агента та палива для сушіння вказаного матеріалу сумішшю димових газів з атмосферним повітрям. Параметри процесу горіння мазуту:

- склад горючої маси мазуту, %: $\text{C} - 85,0$; $\text{H} - 11,4$; $\text{S} - 3,2$; $\text{N}+\text{O} - 0,4$; вміст золи та вологи відповідно $- 0,3\%$ та 3% ;
- теплотворність $Q_{\text{H}}^{\text{p}} = 39\,460$ кДж/кг;
- дійсна витрата атмосферного повітря за $\alpha = 1,2$, $L_{\alpha} = 13,42$ $\text{м}^3/\text{кг}$;
- об'єми продуктів згоряння за $\alpha = 1,2$, $\text{м}^3/\text{кг}$: $\text{CO}_2 - 1,55$; $\text{N}_2 - 10,61$; $\text{O}_2 - 0,65$; $\text{H}_2\text{O} - 1,92$.

15. Витрати тепла, сушильного агента та палива для сушіння вказаного матеріалу сумішшю димових газів з атмосферним повітрям. Параметри процесу горіння природного газу:

- склад сухої маси газу, %: $\text{CH}_4 - 81,7$; $\text{C}_2\text{H}_6 - 5,0$; $\text{C}_3\text{H}_8 - 2,0$; $\text{C}_4\text{H}_{10} - 1,2$; $\text{C}_5\text{H}_{12} - 0,6$; $\text{CO}_2 - 0,4$; $\text{N}_2 - 8,5$; $\text{H}_2\text{S} - 0,6$;
- теплотворність $Q_{\text{H}}^{\text{p}} = 36\,161$ кДж/м³;
- дійсна витрата атмосферного повітря за $\alpha = 1,2$, $L_{\alpha} = 11,50$ $\text{м}^3/\text{м}^3$;
- об'єми продуктів згоряння за $\alpha = 1,2$, $\text{м}^3/\text{м}^3$: $\text{CO}_2 - 1,04$; $\text{N}_2 - 9,17$; $\text{O}_2 - 0,4$; $\text{H}_2\text{O} - 2,14$.

Список література до розділу 3

1. Гинзбург Д. Б. Печи и сушилки силикатной промышленности / Д. Б. Гинзбург, С. Н. Деликишткин, Е. И. Ходоров; под ред. П. П. Будникова. – М.: Стройиздат, 1963. – 343 с.
2. Левченко П. В. Расчеты печей и сушил силикатной промышленности / П. В. Левченко. – М.: Высшая школа, 1968. – 366 с.
3. Роговой М. И. Расчеты и задачи по теплотехническому оборудованию предприятий промышленности строительных материалов: Учебник для вузов. / М. И. Роговой, М. Н. Кондакова, М. Н. Сагановский. – М.: Стройиздат, 1975. – 320 с.
4. Булавин И. А. Тепловые процессы в технологии силикатных материалов: учебник для вузов / И. А. Булавин, И. А. Макаров, А. Я. Рапопорт, В. К. Хохлов. – М.: Стройиздат, 1982. – 243 с.
5. Перегудов В. В. Тепловые процессы и установки в технологии строительных изделий и деталей: учебник для вузов / В. В. Перегудов, М. И. Роговой. – М.: Стройиздат, 1983. – 416 с.
6. Чечеткин А. В. Теплотехника: учебник для хим.-техн. спец. вузов / А. В. Чечеткин, Н. А. Занемонец. – М.: Высшая школа, 1986. – 344 с.
7. Дудеров И. Г. Общая технология силикатов / И. Г. Дудеров, Г. М. Матвеев, В. Б. Суханов. – М.: Стройиздат, 1987. – 560 с.
8. Крупа А. А. Химическая технология керамических материалов: учеб. пособ. / А. А. Крупа, В. С. Городов. – К.: Вища школа, 1990. – 399 с.
9. Кошкарев В. Н. Тепловые установки: учебник / В. Н. Кошкарев, А. А. Кучеренко. – Киев: Вища школа, 1990.
10. Ралко А. В. Теплотехника, тепловые процессы и агрегаты в технологии тугоплавких неметаллических и силикатных материалов / А. В. Ралко, А. А. Крупа, Н. Н. Племянников. – Киев: УМК ВО, 1993. – 396 с.
11. Дуніков О. В. Методичні вказівки для курсового проектування і теплотехнічних розрахунків конвеєрних ліній по виробництву керамічних плиток // О. В. Дуніков, М. І. Рищенко. – Харків: ХДПУ, 2000. – 86 с.
12. Драганов Б. Х. Теплотехніка / Б. Х. Драганов, А. А. Долинський, А. В. Мінденко, К. М. Письмений. – Київ: Вища школа, 2005.
13. Бордюженко О. М. Основи термодинаміки, теплотехніка і теплотехнічне обладнання: Ч. 2. Процеси сушіння, випалу і плавлення. Теплова обробка виробів з бетону і залізобетону: навч. посіб. / О. М. Бордюженко. – Рівне: НУВГП, 2010.
14. Кошельник В. М. Основи проектування теплотехнічних установок підприємств промисловості будівельних матеріалів: навч. посіб. / В. М. Кошельник, Ю. В. Шульгін, О. В. Кошельник, В. В. Соловей. – Харків: НТУ «ХП», 2010.
15. Гоц В. І. Теплові процеси та установки у виробництві будівельних конструкцій, виробів і матеріалів / В. І. Гоц, В. М. Кошкарьов, В. В. Павлюк, С. А. Тимошенко. – Київ: Основа, 2014. – 472 с.
16. Сардак Е. М. Теплові процеси і агрегати в технології тугоплавких неметалевих та силікатних матеріалів: навч. посіб. / Е. М. Сардак, В. І. Голєус, О. В. Зайчук. – Дніпропетровськ: ДВНЗ УДХТУ, 2015. – 248 с.
17. Вінниченко В. І. Енергозбереження та екологія виробництва будівельних матеріалів: навч. посіб. / В. І. Вінниченко, Т. Г. Іващенко, О. М. Рязанов. – Херсон: ОЛДІ-ПЛЮС, 2017. – 212 с.

Наприкінці навчального посібника слід звернути особливу увагу на те, що розрахунок процесу горіння палива, зокрема складання матеріального балансу та визначення температур горіння, розрахунки теплопровідності та теплопередачі у стаціонарних і нестаціонарних умовах, розрахунки витрат тепла та теплоносіїв у процесах сушіння та ін. належать до таких, що потребують багато часу на їх виконання. Крім того, вони є доволі кропіткими, пов'язаними з використанням багатьох складних формул та урахуванням чисельних параметрів, що містяться у довідкових матеріалах. Також теплотехнічні розрахунки вимагають необхідної точності, постійних перевірок та уточнень.

Тому суттєво скоротити час виконання подібних розрахунків та знизити ймовірність похибок можна за допомогою доступних у сучасних операційних системах персональних комп'ютерів і навіть смартфонів, засобів програмування, на кшталт Excel.exe (ОС Windows). За допомогою цих засобів можна також отримати графічну інтерпретацію проведених розрахунків. Не менш важливим є заохочення студентів до складання прикладних програм розрахунків за допомогою мов програмування, що викладаються у рамках дисциплін «Обчислювальна математика та програмування», «Математичне моделювання та оптимізація об'єктів хімічної технології» та інших.

Навчальне видання

НАГОРНИЙ Андрій Олегович

**Теплові процеси в технології тугоплавких неметалевих
і силікатних матеріалів у прикладах і задачах**

Навчальний посібник
для студентів спеціальності 161 «Хімічні технології та інженерія»
освітньої програми «Хімічні технології тугоплавких неметалевих і
силікатних матеріалів» усіх форм навчання

Роботу до видання рекомендував *В. В. Штефан*

Відповідальний за випуск *Я. М. Пітак*

Редактор *Н. В. Верстюк*

План 2019 р., поз. 79

Підп. до друку . . . 2019 р. Формат 60 x 84^{1/16}. Папір офсет.

Друк – ризографія. Гарнітура Times New Roman. Ум. друк. арк. 7,86.

Наклад 50 прим. Зам. № Ціна договірна.

Видавничий центр НТУ «ХП». Свідоцтво ДК № 5478 від 21.08.2017 р.
61002, м. Харків, вул. Кирпичова, 2

Самостійне електронне видання