

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

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до виконання розрахункового завдання

«Теплотехнічні розрахунки роликової конвеєрної печі для виробництва керамічних плиток»

з курсу «Теплотехнічне обладнання підприємств»
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 25.06.2020 р.

Харків
НТУ «ХП»
2020

Методичні вказівки до виконання розрахункового завдання «Теплотехнічні розрахунки роликової конвеєрної печі для виробництва керамічних плиток» з курсу «Теплотехнічне обладнання підприємств» для студентів спеціальності 161 «Хімічні технології та інженерія» освітньої програми «Хімічні технології тугоплавких неметалевих і силікатних матеріалів» усіх форм навчання / уклад. А. О. Нагорний. – Харків: НТУ «ХП», 2020.

Укладач А. О. Нагорний

Рецензент О. Ю. Федоренко

Кафедра технології кераміки, вогнетривів, скла та емалей

Вступ

Виконання розрахункового завдання з дисципліни «Теплотехнічне обладнання підприємств» як однієї з активних форм навчального процесу має досягти таких цілей:

- закріплення знань, що студенти одержують при вивченні дисципліни;
- вміння самостійно обирати вид палива і тип агрегату, виконувати розрахунки тепловмісту та температури продуктів згоряння, теплових витратків та пов'язаними з ними задачами ресурсо- та енергозбереження;
- поглиблення розуміння студентами особливостей процесів теплопередачі у тепловому агрегаті, їх зв'язку з конструктивними параметрами і режимом роботи агрегату та ін.

Розрахункове завдання обов'язково вміщує такі розрахунки:

- температури горіння заданого виду палива;
- режимів роботи агрегату та розподілення температур у ньому;
- витратків тепла у доквілля та вибір теплоізоляційних матеріалів для футерівки секцій агрегату;
- висновки щодо виконаного завдання.

На окремому аркуші мають бути побудовані температурна крива режиму роботи заданого агрегату та температурна крива випалу заданого виду виробів. Виконання всіх теплотехнічних та конструктивних розрахунків, а також побудування температурних кривих можна виконувати за допомогою графічних засобів програмування, на кшталт, Excel.exe (ОС Windows).

1. Характеристика роликкових конвеєрних печей для виробництва плиток

Конвеєрні роликкові печі відрізняються малим перерізом пічних каналів та невеликим навантаженням на конвеєри. Основне призначення конвеєрних печей – швидкісний випал тонкостінних виробів.

В печах використовують роликкові, поличкові, стрічкові (сітчасті) конвеєри з жаростійких сплавів або з вогнетривких матеріалів.

Для сітчастого конвеєра, що працює за температур до 800 °С, використовують дріт зі сталі марки Х23Н13. Для виготовлення роликів, що працюють за температур до 1100 °С, використовують сплави з високим вмістом нікелю і хрому: Х25Т, АХ2318Н, ХН78Т та ін. Наприклад, заміна сплаву Х23Н18 на залізохромнікелевий – ХН45-10 дає можливість збільшити температуру випалу у печі до 1120 °С, а також термін служби

роликів. Трубчасті ролики з муліту, корундомуліту, корунду успішно працюють і за більш високих температур.

При одноярусному завантаженні виробів на конвеєрі з циклу випалу у конвеєрних печах вилучається час, необхідний для вирівнювання температури за висотою пічного каналу, тобто скорочується тривалість випалу тонкостінних виробів.

В одній з таких печей, спроектованій НДІ будівельної кераміки, що призначена для першого (утильного) випалу лицювальних плиток, канал має довжину 19,6 м, ширину 1,3 м, висоту 0,22 м; він виконаний з шамотного вогнетриву та теплоізолюваний легковаговим шамотом і діатомітом. Зона підігріву та випалу має довжину 8,4 м, а зона охолодження – 11,2 м. Ролики конвеєра мають діаметр 32 мм і довжину 2330 мм.

Обертання роликів виконується ланцюговою передачею від привідної станції, у якій передбачена можливість зміни швидкості конвеєра. Пічний канал розділений на сім секцій довжиною по 2,8 м, які вільно переміщуються на рамі конвеєра.

Згідно з режимом нагрівання і охолодження в першій, другій і третій секціях під роликівим конвеєром встановлено по п'ять пар пальників В-28/1,7 і В-28/1,9, а також дві пари пальників В/1,3 над роликами у п'ятій секції. Тиск газу у пальниках становить 0,14 МПа.

Зона випалу відокремлена від зони підігріву та зони охолодження порогом каналу до мінімальної щілини, необхідної для розміщення роликів і проходження плиток. Головне призначення порогів – це вирівнювання температури на окремих ділянках печі і забезпечення незалежної вентиляції на ділянках.

Режим випалу виробів в конвеєрних печах ступеневий. Його розраховують, виходячи з вимог припустимих швидкостей нагріву й охолодження на кожній ділянці температурної кривої.

У піч плитка надходить з відносною вологістю менше за 0,2 %, тому початкова температура в печі може дорівнювати 400 °С. На окремих ділянках швидкості нагрівання й охолодження змінюються від 45 до 900 °С/хв.

Залежно від складу плиток тривалість випалу знаходиться в межах 42–100 хв за продуктивності печей 0,8–1,0 млн м² на рік. Газова атмосфера у печі має бути обов'язково окислювальною. Реально досяжний коефіцієнт витрати повітря для горіння палива 1,2–1,4. Питомі витрати умовного палива становлять: 2,7 кг/м² лицювальних глазурованих плиток; 2,8 кг/м² плиток для підлоги; 3,5 кг/м² литих плиток.

У табл. 1.1 наведені характеристики роликівих конвеєрних печей, розроблених у НДІ будівельної кераміки.

Таблиця 1.1 – Характеристики роликів конвеєрних печей відкритого полум'я

Показники	Значення показників печей для випалу плиток								
	Лицювальні плитки					Плитки для підлоги	Дворазовий випал фасадних плиток		
	Дворазовий випал				Одно-разовий випал		утильний	политий	
	утильний	политий	утильний	политий					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Довжина печі, м	22,4–24	39,6–42	33	56	33,6	42	60	27	27
Ширина пічного каналу у світлі, м	0,9	0,9	1,15	1,3	0,9	0,9	1,15	1,1	1,1
Висота пічного каналу в зоні випалу від рівня поду до замка склепіння, м	0,62	0,62	0,73	0,75	0,62	0,62	0,73	0,65	0,65
Об'єм пічного каналу, м ³	9,5–10	18–19	22	44	16	19	41	14,5	14,5
Число секцій всього, у тому числі у зонах:	8	14	11	18	12	15	20	9	9
підігріву	2,5	4	3	6	4,5	8,5	10,5	3	3
випалу	1,5	3	2	4	2,5	1,5	2,5	1,5	1,5
охолодження	4	7	6	8	5	5	7	4,5	4,5
Кількість роликів всього	320	560	510	740	480	810	1200	540	54
Довжина роликів, м	1,96	1,96	2,18	2,33	1,96	1,96	2,18	1,88	1,88
Діаметр роликів, мм	28	28	32	32	28	28	32	28	28
Відстань роликів, мм	70–75	71–75	65	76	70	52	50	50	50
Тип пальників	В-21, 28	В-28	В-21	В-24	В-21, В-28				
Продуктивність пальників, м ³ /год	1,3–2,5	1,3	1,3–2,5						
Число пальників всього, в тому числі:	25	40	39	46	47	56	123	31	31
нижніх	20	40	29	46	41	50	71	21	21
верхніх	5	-	10	-	6	6	52	10	10
Річна продуктивність печі, тис. м ² на рік	250	250	500	500	200	200	400	200	200

1.1. Піч утильного випалу від лінії МРГП-500

Така піч має загальну довжину 29,2 м, в тому числі 5,785 м під обдувальний пристрій. Піч складається з вісьмох секцій довжиною 3,08 м і однієї секції довжиною 4,6 м, які спираються на раму роликового конвеєра.

Перша секція є продовженням конвеєрної сушарки і за конструкцією аналогічна секціям сушарки, але відрізняється від них довжиною і відсутністю пальників.

Ширина робочого каналу печі 1,15 м. Кожна секція має свій каркас, не зв'язаний з роликовим конвеєром. Стіни печі – двошарові, викладені з легковагової шамотної цегли та заізольовані легковаговою цеглою з пінодіатоміту.

Зона випалу відокремлена від зони охолодження порогом із шамотної цегли, який розміщується зверху і знизу рольганга. Ще два пороги поділяють зону охолодження на три ділянки різної інтенсивності охолодження відповідно з температурною кривою. Кожна ділянка у склепінні має витяжний отвір для відбору гарячого повітря. На першій ділянці зони охолодження над і під рольгангом розміщені вікна для подачі холодного повітря. На ділянці зони охолодження, де температура становить 600–400 °С, необхідний режим охолодження забезпечується практично видатками тепла в навколишнє середовище.

На ділянці високих температур корпус печі оснащений зверху і з боків металевим кожухом. Ширина кладки печі на цій ділянці разом з кожухом 360 мм. В корпусі печі для спостереження за робочим простором розміщені оглядові вікна, а також отвори діаметром 30 мм для установлення термопар. Для очищення поду печі з кожного її боку розміщено по чотири вікна розміром 230×136 мм.

Роликовий конвеєр печі вміщує 318 роликів із жаростійких сталей різних марок довжиною 2200 мм і діаметром 32 мм. Відстань роликів дорівнює 70 мм. Плитки переміщуються конвеєром у шість рядів. Швидкість конвеєра 1,46 м/хв.

Піч обладнано двадцятьма пальниками Ф 24/1,5, розміщеними під рольгангом, а також чотирнадцятьма пальниками Ф 21/1,3 над рольгангом з двох боків, у шаховому порядку вздовж всієї зони підігріву і випалу. Це інжекційні пальники середнього тиску типу В серії 4905-1. Носики пальника входять в пальникові тунелі, викладені з так званих пальникових цеглин, під кутом до поду, склепіння й осі печі, назустріч потоку плитки.

В зоні охолодження на ділянці температур 600–400 °С для виведення печі на режим під рольгангом встановлено три пальники Ф 21/1,3.

Димові гази відбираються в першій секції печі. Газорозподіл в печі складається з окремих закільцьованих ділянок, обладнаних запорною арматурою, регулюючими кранами КР-200, малометрами і продувками на свічу. Для розпалювання пальників піч оснащена типовими інжекційними газовими запальниками.

Система вентиляції робочого каналу печі і подачі димових газів у сушарку складається з цегельного каналу (борова), прокладеного вздовж печі, і витяжних патрубків, які входять в газохід печі. Димові гази видаляють відсмоктувальним вентилятором Ц 4-70 № 5 з числом обертів 1430 об/хв, продуктивністю 6000 м³/год і робочим тиском 75 Па.

Система вентиляції кожуха – це повітропровід, прокладений під кожухом вздовж всього корпусу печі, з якого йде відгалуження з діафрагми в кожній секції для вентиляції підкожухового простору. Посередині повітропроводу до нього під'єднано вентилятор Ц 4-70 з числом обертів 1480 об/хв, продуктивністю 6800 м³/год. На ділянці різкого охолодження плиток від максимальної температури до 600 °С (в секціях 6 і 7), у піч з повітропроводу подається холодне повітря через регулюючі шибери і два патрубки діаметром 100 мм, які розміщені над і під рольгангом. Повітропровід під'єднано до дуттьового вентилятора обдувального пристрою для охолодження плиток. Цей пристрій, змонтований біля виходу з печі у секції довжиною 5,75 м, являє собою дві зборки колекторів з перфорованими трубами, розміщеними на відстані 80 мм від осі роликів над і під рольгангом. Пристрій для охолодження плиток має верхнє накриття з витяжними патрубками.

Повітря нагнітає приливний вентилятор Ц 4-70 № 6,3 з числом обертів 1450 об/хв, продуктивністю 1300 м³/год і робочим тиском 85 Па. Нагріте повітря відбирає витяжний осьовий вентилятор Ос-300 № 8 з числом обертів 930 об/хв, продуктивністю 13000 м³/год і робочим тиском 13 Па.

Продуктивність печі утильного випалу 79,5 м² плиток на годину. Тривалість утильного випалу становить 20 хв, у тому числі обдування 3,6 хв. Початкова температура в печі 250 °С, максимальна температура випалу становить 1100 °С. Тривалість ізотермічної витримки за температури 1100 °С становить 3,5 хв. Питомі витрати теплоти 2280 кДж/кг плиток, витрати умовного палива 73 г/кг плиток або 0,75 кг/м³ плиток.

1.2. Піч политого випалу від лінії МРГП-500

Вона складається з 16 секцій. Довжина печі 50,6 м, ширина робочого каналу 1,3 м. Перші три секції за конструкцією є аналогічними до відповідних секцій утильної печі. Вони призначені для підсушки і піді-

гріву поливних плиток до температури 400 °С теплом відхідних газів і тому пальників не мають.

Четверта, п'ята і шоста секції мають нижній муфельний канал, перекритий плитами з жаростійкого чавуну. Секції 7–11 утворюють зону високих температур, відокремлену від суміжних секцій верхніми і нижніми порогами.

Конструкція зони охолодження така ж сама, як і в утильній печі. Роликовий конвеєр має 729 роликів із жаростійких сталей різних марок довжиною 2350 мм, діаметром 32 мм і відстанню 70 мм. Швидкість конвеєра 1,7–1,9 м/хв.

У секціях 4–6, де температура підвищується з 400 до 600 °С, розташовано по дванадцять пальників Ф 28/1,7 над і під рольгангом. Зону високих температур в секціях 7–11 обладнано вісімнадцятьма верхніми пальниками Ф 21/1,3. Такі ж пальники, але як резервні, розташовані під рольгангом.

Температура в секціях 6–7 підвищується з 600 до 1000 °С, а в секціях 8–11 утворюють ділянку ізотермічної витримки за температури 1000 °С. Секції 12–16 утворюють зону охолодження, обладнану п'ятьма верхніми пальниками Ф 21/1,3. У секції 12 температура знижується з 1000 до 600 °С, в секціях 13–15 – з 600 до 400 °С, а в секції 16 – з 400 до 200 °С. Далі плитки надходять у відкриту ділянку зони охолодження довжиною 5,75 м, обладнану обдувальним пристроєм для охолодження плиток до температури 50 °С.

Газорозподіл у печі, системи вентиляції робочих каналів печі, подачі димових газів у сушарку, а також системи вентиляції кожуха печі, подачі холодного повітря і обдувальний пристрій є аналогічними утильній печі.

Тривалість политого випалу становить 31 хв, в тому числі: обдування – 3,1 хв, ізотермічної витримки за максимальної температури випалу 1000 °С – 7 хв. Початкова температура в печі 250 °С. Питомі витрати теплоти дорівнюють 2280 кДж/кг плиток, питомі витрати умовного палива 0,073 кг/кг плиток або 0,82 кг/м² плиток.

Режими однорядного випалу плиток у роликівих печах наведені у табл. 1.2 та 1.3.

В межах загальної тривалості кожної стадії процесу випалу, швидкості нагрівання і охолодження є диференційованими для окремих ділянок. Розрахунки роликівих конвеєрних печей виконують з урахуванням таких даних:

- загальна кількість експлуатаційних днів на рік – 345;
- загальний річний фонд машинного часу з урахуванням планових і аварійних зупинок – 6600–6980 год/р.;
- коефіцієнт виходу придатної продукції – 0,92–0,96.

Таблиця 1.2 – Основні показники режимів одноразового випалу керамічних плиток у роликівих конвеєрних печах

Найменування плиток	Максимальна температура випалу, °С	Тривалість, хв			
		нагріву	ізотермічної витримки	охолодження	всього
Лицювальні поливні плитки: (150x150x5) мм	1100	14	5	11	30
Плитки для підлоги: (100x100x9) мм (150x150x11) мм (150x150x13) мм	1120	23	5	14	42
	1120	28	7	17	52
	1120	32	8	22	62
Плитки для підлоги поливні: (200x200x11) мм (100x200x13) мм	1100	38	10	27	75
	1100	44	11	32	87
Плитки фасадні мозаїчні поливні: (48x48x4,5) мм	980	12	8	10	30
Плитки фасадні литі поливні: (50x50x4) мм	1020	12	8	15	35
Плитки фасадні (120x65x7) мм (120x75x7) мм	1050	25	8	17	50
	1050	25	8	17	50

Таблиця 1.3 – Основні показники режимів дворазового випалу керамічних плиток у роликівих конвеєрних печах

Найменування плиток	Утильний випал					Политий випал					Сумарна тривалість, хв
	Максимальна температура, °С	Тривалість, хв				Максимальна температура, °С	Тривалість, хв				
		нагріву	витримки	охолодження	всього		нагріву	витримки	охолодження	всього	
Плитки лицювальні поливні: (150x150x5) мм	1100	5	3	9	17	1100	14	5	11	30	47
Плитки фасадні: (120x65x7) мм (150x75x7) мм	1100	10	5	15	30	1050	10	5	12	27	57
	1100	10	5	15	30	1050	10	5	12	27	57
Плитки фасадні: (150x150x10) мм (250x150x10) мм	1100	14	6	20	40	1050	12	8	20	40	80
	1100	14	6	20	40	1050	12	8	20	40	80

1.3. Роликові муфельні конвеєрні печі

Для створення окислювального газового середовища, яке необхідне при випаленні плиток, вкритих кольоровими поливами, застосовують муфельні конвеєрні печі або печі з безпосереднім нагрівом газовими інжекційними пальниками Ф-15/0,9, Ф-21/1,3 і Ф-24/1,5 з попереднім змішуванням газу і повітря. Використання муфельних конвеєрних печей є особливо важливим, коли використовується рідинне паливо – мазут. У щільових печах немає умов для повного згоряння рідинного палива. Тому вибір муфельного варіанта конвеєрної печі для заводів, що не використовують природний газ, дає можливість виготовляти плитки кращої якості, ніж при безпосередньому омиванні плиток продуктами згоряння мазуту. Особливість муфельних печей полягає у відсутності безпосереднього контакту димових газів з виробами, що випалюються. Продукти згоряння, надходячи в муфельний простір, розпікають стінки муфелю, а останні в свою чергу випромінюванням передають теплоту виробам, що випалюються.

Наприклад, одноканальна муфельна піч для випалу лицювальних плиток має ширину каналу 0,9 м, висоту до замка склепіння 0,5 м. Довжина зон підігріву й випалу – 28 м, зони безпосереднього охолодження плиток повітрям – 14 м. Під і склепіння муфельного каналу викладені з карборундових плит, а бокові стіни – з шамотної легковаги ШЛБ-0,4. Гази з нижніх топків проходять під муфельним каналом, а з верхніх топків – над його склепінням і далі боровом до рекуператора і димососу. Кількість і температуру топкових газів регулюють кількістю палива, що спалюється у форсунках. П'ять нижніх топків розташовані в поду топкового каналу з нахилом 30° у бік зони підігріву. Карборундове склепіння муфелю нагрівається шістьма боковими топками. Піч викладена з високоглиноземного вогнетриву і теплоізолювана шамотною легковаговою та пінодіатомітовою цеглою.

Плитки охолоджуються безпосередньо (без муфельних перегородок) зустрічними потоками повітря, яке подається вентилятором крізь щілиноподібні канали у стінах печі.

Ролики конвеєра, як і в інших печах, мають зірочки для спалювання мазуту. Вихрові форсунки з пароповітряним розпиленням дають короткий факел. Найбільша продуктивність форсунки 15 кг/год за тиску пари 0,25–0,3 МПа і повітря 0,00196 МПа. Тиск мазуту (0,2 МПа) створюється помпами НШ-3 з приводами від електродвигунів постійного струму. За допомогою регуляторів збудження РВ-5202 виконується безступеневе (плавне) регулювання продуктивності кожної форсунки згідно з режимом випалу. Технічна характеристика деяких муфельних печей наведена у табл. 1.4.

Таблиця 1.4 – Характеристика муфельних роликкових печей

Найменування показників	Значення показників печей для випалу	
	лицювальних плиток (политий випал)	плиток для підлоги
Довжина печі, м	45	42
Довжина муфельних каналів, м	22	28
Ширина пічного каналу у світлі, м	0,86	0,9
Висота пічного каналу від рівня муфельних плит поду до плит склепіння, м	0,412	0,473
Об'єм пічного каналу, м ³	15	16
Число секцій, всього,	19	14
в тому числі у зонах:		
підігріву	5	8
випалу	5	1,5
охолодження	9	4,5
Кількість роликів всього	760	810
Довжина роликів, м	1,98	1,88
Діаметр роликів, мм	28	28
Відстань роликів, мм	60	50
Паливо	газ	мазут
Тип пальників (форсунок)	В-28	вихрова
Продуктивність пальників за нормальних умов: пальників (м ³ /год), форсунок (кг/год)	2–2,25	15
Кількість пальників (форсунок) всього,	64	11
у тому числі:		
нижніх	40	6
верхніх	24	5
Річна продуктивність печі, тис.м ² /р	250	200

За допомогою табл. 1.1 та 1.4 студент отримує завдання (номер стовпчика у цих таблицях відповідає варіанту завдання), а саме: тип печі, асортимент плиток, вид випалу, продуктивність печі.

Скориставшись табл. 1.2 та 1.3, відповідно до заданого асортименту плиток, обираються необхідні розміри плитки, а також максимальна температура випалу та тривалість знаходження плиток у зонах підігріву, витримки та охолодження печі.

Максимальна температура випалу у конвеєрній печі має бути забезпечена шляхом спалювання газоподібного або рідинного палива. Тому наступним етапом розрахункового завдання є визначення температури горіння заданого виду палива з метою оцінки його придатності для виробництва конкретного асортименту плиток.

2. Розрахунок температури горіння палива

Для виконання розрахунку з табл. 2.1 для заданого виду палива обирають відповідні значення загального об'єму продуктів згорання V_α , дійсної витрати повітря для горіння L_α та теплотворності Q_H^p .

Таблиця 2.1 – Склад продуктів згорання, дійсні витрати сухого повітря для горіння та теплотворність деяких видів палива за $\alpha = 1,2$

Вид палива	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		
Мазут 1	1,538	0,022	10,618	0,651	1,952	13,438	39773
Газ 1	1,090	0,035	9,230	0,407	2,133	11,638	35824
Мазут 2	1,55	0,019	10,765	0,66	1,885	13,628	40099
Газ 2	0,985	-	9,59	0,588	2,165	12,142	35133
Мазут 3	1,564	0,006	9,598	0,425	1,66	12,145	38698
Газ 3	1,011	-	10,539	0,799	2,213	13,328	35845
Газ 4	0,985	-	8,627	0,38	2,065	10,845	34060
Мазут 4	1,534	0,022	10,605	0,651	1,921	13,423	39456
Газ 5	0,993	-	8,87	0,39	2,136	11,189	35107
Мазут 5	1,572	0,008	10,05	0,445	1,789	12,721	40585
Газ 6	1,073	-	9,54	0,422	2,24	12,072	37669

Спочатку за формулою (2.1) розраховують ентальпію газової суміші продуктів згорання палива за калориметричної температури, кДж/м³:

$$I_\Gamma = \frac{Q_H^p + c_{\text{п}} \cdot t_{\text{п}} + c_{\text{пов}} \cdot t_{\text{пов}} \cdot L_\alpha}{V_\alpha}, \quad (2.1)$$

де $c_{\text{п}}$, $c_{\text{пов}}$ – відповідно теплоємності палива і повітря, які для природного газу можуть бути обраними у межах 1,55–1,67 кДж/(м³·°С), для мазуту 1,88–2,05 кДж/(кг·°С), для повітря 1,3 кДж/(м³·°С); $t_{\text{п}}$ – температура палива, для природного газу зазвичай складає 15–20 °С, мазут підігрівають до температури 80–100 °С; $t_{\text{пов}}$ – температура повітря, що надходить на горіння, приймається з урахуванням умов утворення газоповітряної суміші, $t_{\text{пов}} = 20$ –100 °С.

Далі за $I - t$ діаграмою (рис. 2.1) визначають орієнтовне значення калориметричної температури горіння палива $t_{\text{к.ор}}$. Для більш точного визначення калориметричної температури необхідно задатись двома температурами t_1 та t_2 , які б задовольняли нерівності ($t_1 < t_{\text{к.ор}} < t_2$).

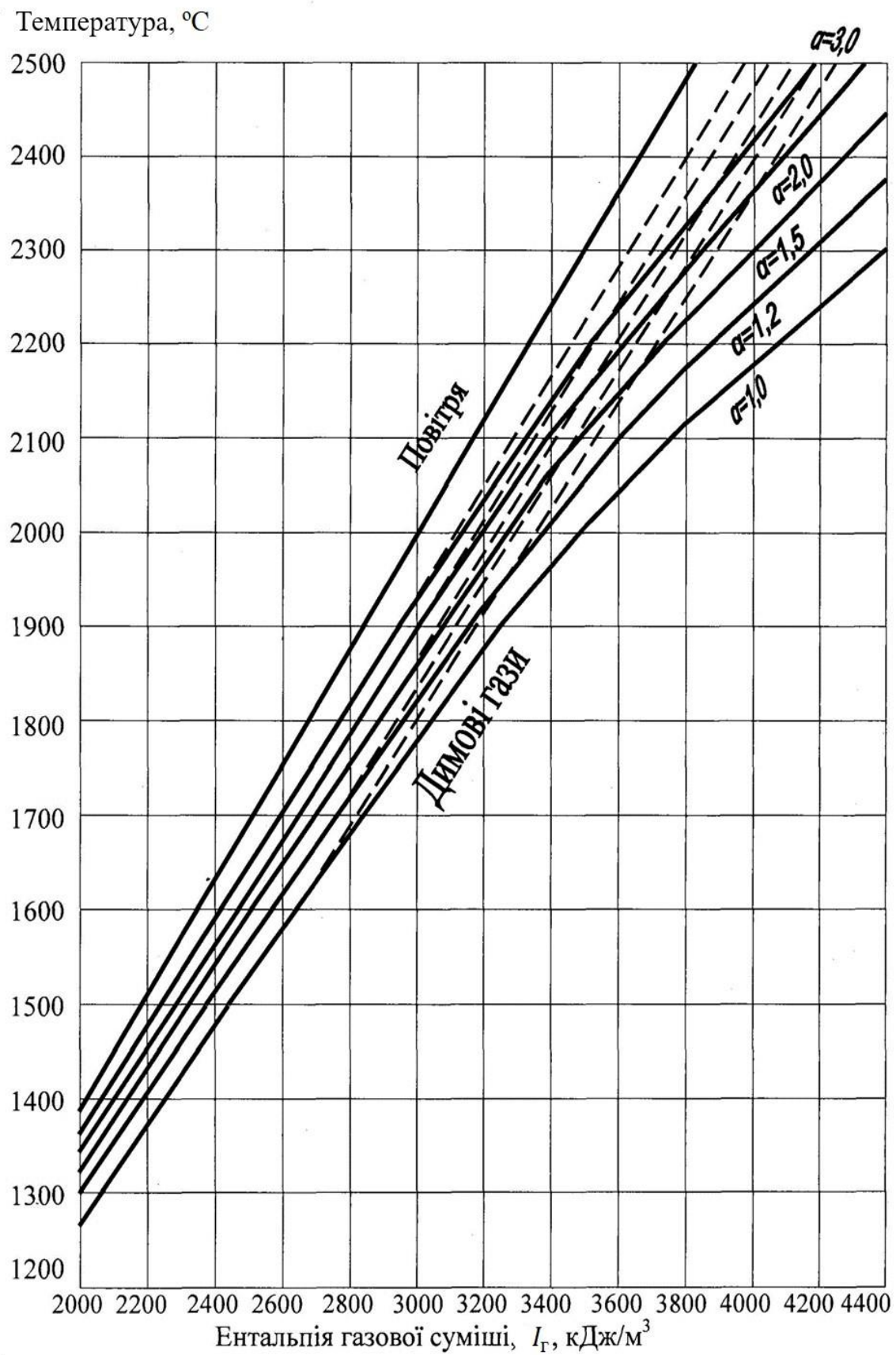


Рис. 2.1. $I - t$ діаграма для високих температур

Для цих температур необхідно визначити ентальпії продуктів згоряння за формулами (2.2) та (2.3), кДж/м³:

$$I_{r1} = 0,01 \cdot \sum (I_{i1} \cdot x_i); \quad (2.2)$$

$$I_{r2} = 0,01 \cdot \sum (I_{i2} \cdot x_i); \quad (2.3)$$

де I_{i1} , I_{i2} – відповідно ентальпії газових компонентів (CO_2 , SO_2 , N_2 , O_2 , H_2O) у продуктах згоряння палива за температур t_1 і t_2 , кДж/м³ (див. табл. 2.2); x_i – відсотковий склад газових компонентів у продуктах згоряння палива, який визначається за формулою (2.4), %:

$$x_i = \frac{V_{x_i} \cdot 100}{V_{\alpha}}, \quad (2.4)$$

де 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} , $V_{\text{H}_2\text{O}}$), м³/м³ або м³/кг (див. табл. 2.1).

Тоді калориметричну температуру горіння палива можна розрахувати за формулою (2.5), °С:

$$t_k = t_1 + \frac{(I_r - I_{r1}) \cdot (t_2 - t_1)}{(I_{r2} - I_{r1})}. \quad (2.5)$$

Дійсну температуру горіння палива розраховують за формулою (2.6), °С:

$$t_d = t_1 + \frac{(I_r \cdot \eta_{\text{п}} - I_{r1}) \cdot (t_2 - t_1)}{(I_{r2} - I_{r1})}, \quad (2.6)$$

де $\eta_{\text{п}}$ – пірометричний коефіцієнт процесу горіння, для розрахунків значення $\eta_{\text{п}}$ вибирають у межах 0,73–0,85.

Таблиця 2.2 – Ентальпія повітря та деяких газів, кДж/м³

Температура, °C	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

3. Розрахунки режимів роботи та розподілення температур у печі

Метою цих розрахунків є пов'язання наданої продуктивності печі з режимом її роботи, а саме, з максимальною температурою випалу та тривалістю знаходження плиток відповідного асортименту та розмірів у зонах підігріву, витримки та охолодження.

3.1. Розрахунок режиму роботи печі

Спочатку за формулою (3.1) розраховують годинну продуктивність печі, м²/год:

$$P_{\text{год}} = \frac{P_p \cdot 1000}{R \cdot r_{\text{п}}}, \quad (3.1)$$

де P_p – надана річна продуктивність конвеєрної печі, тис. м²/р (згідно з табл. 1.1); R – кількість годин роботи печі на рік, $R = 6664\text{--}6982$ год/р; $r_{\text{п}}$ – коефіцієнт виходу придатної продукції, $r_{\text{п}} = 0,92\text{--}0,96$.

Далі за формулою (3.2) розраховують масу висушених плиток, кг/м²:

$$m_c = \frac{m_b \cdot 100}{100 - \text{в. п. п.}}, \quad (3.2)$$

де m_b – маса 1 м² випалених плиток (для плиток для підлоги завтовшки 9 мм – 23 кг/м²; для тих же плиток, але завтовшки 11 мм – 27 кг/м²; для фасадних плиток завтовшки 7 мм – 13 кг/м²; для лицювальних плиток – 10 кг/м²); в. п. п. – втрати при прожарюванні матеріалу плиток, обирають у межах 7–10 %.

Тоді годинна витрата сухої плиткової маси за формулою (3.3) складатиме, кг/год:

$$G_M = P_{\text{год}} \cdot m_c. \quad (3.3)$$

Швидкість конвеєра розраховується за формулою (3.4), м/хв:

$$v_k = \frac{P_{\text{год}} \cdot Z}{60 \cdot n \cdot l \cdot k}, \quad (3.4)$$

де Z – відстань плиток вздовж конвеєра, тобто відстань між початком попередньої і наступної плитки, яка має бути більшою, ніж розмір плитки вздовж конвеєра на 15–25 мм при утильному або одноразовому випа-

лі та на 80–100 мм при политому випалі, m ; n – кількість плиток по ширині конвеєра; l, k – відповідно довжина й ширина плитки, м.

З досвіду експлуатації конвеєрних печей відомо, що оптимальною вважається швидкість конвеєра у межах 0,6–1,3 м/хв, проте у кожному конкретному випадку її величина може бути відмінною від оптимальної (наприклад, більшою при политому випалі) і залежати від виду випалу, асортименту плиток, конструктивних особливостей печі тощо (див. розділ 1).

Тривалість випалу у печі розраховується за формулою (3.5), хв:

$$\tau_{\text{вип}} = \frac{L_{\text{п}}}{v_{\text{к}}}, \quad (3.5)$$

де $L_{\text{п}}$ – довжина печі, м (див. табл. 1.1 і 1.4).

Отримане значення слід порівняти з рекомендованими у табл. 1.2 та 1.3, а потім оцінити правильність проведених розрахунків.

3.2. Розрахунки розподілення температур у печі

Згідно з отриманими даними і конструктивними особливостями обраної печі необхідно побудувати температурну залежність (криву) нагріву й охолодження плиток від довжини печі і тривалості випалу, а також залежність середньої температури у печі від її довжини і тривалості випалу (приклад таких кривих наведених на рис. 3.1).

Для побудови температурної кривої враховують безпечні швидкості нагріву й охолодження плиток у печі (табл. 3.1), а також те, що границями ділянок в більшості випадків є такі температури:

- в зоні підігріву і випалу: 300–400 °С, 700–800 °С, 900–950 °С і максимальну температуру;
- в зоні охолодження: 600 °С, 500–400 °С і 320–300 °С.

Таблиця 3.1 – Безпечні швидкості нагріву й охолодження плиток

Інтервал температур, °С	Безпечна швидкість нагріву й охолодження плиток, °С/хв
140–500	900
500–700	80
700–1250	230
1250–650	67
650–400	45
400–250	50

Наприклад, розрахунок температурної кривої утильного випалу лицювальних плиток у печі довжиною 24 м (див. табл. 1.1) можна виконати таким чином.

Піч має 8 секцій, в тому числі в зоні підігріву – 2,5 секції, в зоні випалу – 1,5 секції, в зоні охолодження – 4 секції. Довжина однієї секції дорівнює $24/8 = 3$ м, кожна секція має $320 \cdot 3/24 = 40$ роликів.

Крім того, є відомою (рекомендованою) така інформація:

- температура плиток на вході у піч – 140 °С;
- максимальна температура випалу – 1080 °С;
- температура виходу плиток із закритої ділянки зони охолодження печі – 350 °С;
- температура димових газів на виході з печі – 400 °С;
- температура охолоджуючого повітря на вході у піч – 20 °С, а на виході з печі – 400 °С;
- температура плиток на границях ділянок печі залежить від часу знаходження плиток на ділянці та температури на ділянці; практика експлуатації печей обумовлює необхідність мати температуру плиток нижчою на 20–100 °С, а в зоні охолодження більш високою у тих же межах, ніж температура у печі.

На підставі цих даних розраховують режими нагріву й охолодження лицювальних плиток в зазначеній печі. Результати розрахунків приводять у табличному вигляді, на кшталт табл. 3.2.

Спочатку заповнюють перший, другий і третій стовпчики таблиці, у яких за допомогою табл. 3.1 для кожної секції обирають орієнтовні інтервали температур та максимальні швидкості нагріву й охолодження.

Потім за формулою (3.6) розраховують мінімально можливий час знаходження плиток у секціях печі і заповнюють четвертий стовпчик таблиці, хв:

$$\tau_{\text{мін}} = \frac{\Delta t}{v_{\text{макс}}}, \quad (3.6)$$

де Δt – орієнтовний інтервал температур у секції, °С; $v_{\text{макс}}$ – максимально можлива швидкість нагріву (охолодження) у секції, °С/хв.

Далі розраховують дані для сьомого стовпчика. Наприклад, швидкість конвеєра, що розрахована за формулою (3.4), дорівнює 0,923 м/хв. Тоді тривалість знаходження плиток у кожній з восьми секцій (з урахуванням загальної довжини печі 24 м) за формулою (3.5) становитиме:

$$\tau_{\text{опт}} = \frac{24}{0,923 \cdot 8} = 3,25 \text{ хв.}$$

Після заповнення сьомого стовпчика табл. 3.2 аналізують співвідношення оптимальної і мінімальної тривалості знаходження плиток у секціях. Наприклад, у другій секції можливе збільшення температурного інтервалу завдяки тому, що оптимальна швидкість, розрахована за формулою (3.6), не перевищує максимальну (80 °C/хв):

$$v_{\text{опт}} = \frac{\Delta t}{\tau_{\text{опт}}} = \frac{750 - 500}{3,25} = 76,9 \text{ } ^\circ\text{C/хв.}$$

Розраховані таким чином оптимальні швидкості заносять до шостого стовпчика з одночасним корегуванням температурного інтервалу у відповідній секції (п'ятій стовпчик).

У п'ятій і шостій секціях (в інтервалі температур від максимальної до 650 °C) необхідно намагатися, щоб оптимальна швидкість була якомога близькою до максимальної. В даному випадку невідому кінцеву температуру плиток у п'ятій секції розраховують як середню: $(1080 + 650)/2 = 865 \text{ } ^\circ\text{C}$ або $(1080 - 650)/2 + 650 = 865 \text{ } ^\circ\text{C}$, але можливі й інші рішення.

Аналогічним чином розраховують температурний інтервал у сьомій і восьмій секціях. Перед заповненням восьмого стовпчика таблиці, за допомогою розрахованого режиму нагрівання й охолодження, будують графік зміни температури плиток (суцільна лінія на рис. 3.1).

Режим зміни температури у печі можна одержати розрахунковим або графічним способом. При цьому слід взяти до уваги, що:

- димові гази і повітря на виході з печі (відповідно у першій і восьмій секціях) мають температуру 400 °C;
- температура у печі може бути більшою, а в зоні охолодження нижчою на 20–100 °C за температуру плиток;
- на границі зон випалу і охолодження, у місці розташування порогу градієнт температур у печі і плиток може сягати 100 °C і більше.

Графік зміни температури у печі (пунктирна лінія на рис. 3.1) будують таким чином. У зонах підігріву і випалу з'єднують лінією точку, яка відповідає середній для першої секції температурі – 400 °C, з точкою на початку четвертої секції, що відповідає температурі 1100 °C (є вищою на 20 °C за температуру плиток). В зоні охолодження з'єднують лінією точку, яка відповідає середній температурі у восьмій секції 400 °C, з точкою на початку п'ятої секції, що приблизно на 100 °C нижче за температуру у зоні випалу. Можливі й інші підходи для одержання температурних кривих, проте найбільш надійними є експериментальний шлях.

Середні для кожної секції температури у печі визначають за графіком (пунктирна лінія) та заносять у восьмий стовпчик табл. 3.2.

Таблиця 3.2 – Розрахунок режиму випалу

Номер секції	Орієнтовний інтервал температур, °С	Максимальна швидкість, °С/хв	Мінімальний час, хв	Скоригований інтервал температур, °С	Оптимальна швидкість, °С/хв	Оптимальний час, хв	Середня температура у секції, °С	Кількість роликів у секції
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	(140–500)	900	0,4	(140–500)	110,8	3,25	400	40
2	(500–700)	80	2,5	(500–750)	76,9	3,25	700	40
3	(700–1080)	230	1,65	(750–1080)	101,5	3,25	950	40
4	1080	0	–	1080	0	3,25	1100	40
5	(1080–)	67	3,21	(1080– 865)	66,2	3,25	925	40
6	(–650)	67	3,21	(865–650)	66,2	3,25	750	40
7	(650–)	45	2,7	(650–525)	38,5	3,25	375	40
8	(–400)	50	2,5	(525–400)	38,5	3,25	400	40

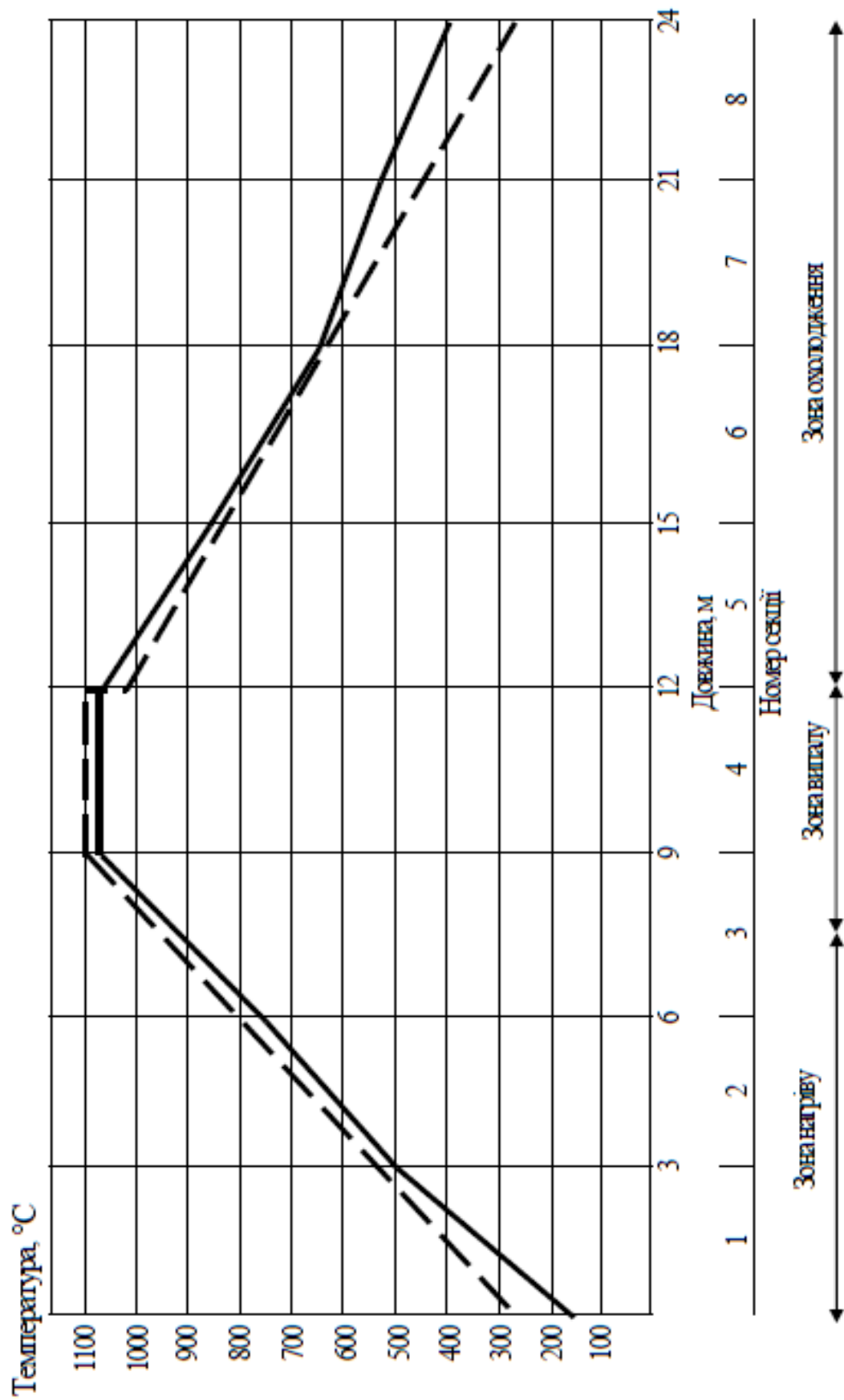


Рис. 3.1. Температурні криві випалу: - - - температура в печі, — температура плиток

4. Розрахунки видатків тепла у довкілля

Виконання цих розрахунків має на меті вибір матеріалів для теплової ізоляції кожної секції печі, виходячи з визначених для них у п. 3.2 середніх температур (див. табл. 3.2). Розрахунки слід починати з тієї секції (або секцій), температура в якій є максимальною. Для печі, розглянутої у розділі 3, це четверта секція – секція випалу.

На початку необхідно з табл. 4.1 обрати теплоізоляційні матеріали для футерівки секції. Наприклад, для секції випалу з внутрішньою температурою 1100 °С можна обрати тришарову футерівку з наступних матеріалів у порядку зниження робочих температур:

- 1-й шар: компактна шамотна цегла густиною 1900 кг/м³;
- 2-й шар: легковага шамотна цегла ШЛБ-0,6 густиною 600 кг/м³;
- 3-й шар: пінодіатомітова цегла ПД-400 густиною 400 кг/м³.

Таблиця 4.1 – Орієнтовний набір теплоізоляційних матеріалів

Найменування матеріалу	Густина, кг/м ³	Припустима робоча температура, °С	λ , Вт/(м·°С)	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

Для цієї футерівки розраховують температуру, яку буде мати зовнішня поверхня секції. Отримана величина є показником правильного вибору матеріалів, а отже, ефективності обраної футерівки щодо зниження видатків тепла у довкілля.

В ході проведення розрахунків необхідно намагатись, щоб розрахункова температура зовнішньої поверхні печі знаходилась у межах: (30–80) °С для зон підігріву і охолодження; (50–100) °С для зони випалу.

Оскільки для секції випалу ізоляція складається з i шарів (у наведеному прикладі з трьох) різних матеріалів, то температуру зовнішньої поверхні i -го шару ізоляції розраховують за формулою (4.1), °С:

$$t_{i.зоб} = t_{i.вн} - q_{нс} \cdot \frac{\delta_i}{\lambda_i}, \quad (4.1)$$

де $q_{нс}$ – щільність теплового потоку, що передається в навколишнє середовище, Вт/м²; $t_{i.вн}$, $t_{i.зоб}$ – відповідно температури на внутрішній та зовнішній поверхнях 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 у табл. 4.1.

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 (4.2), °С:

$$t_{i.сеп} = \frac{t_{i.вн} + t_{i.зоб}}{2}. \quad (4.2)$$

Для одержаної середньої температури розраховують коефіцієнт теплопровідності і потім за формулою (4.1) 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 розрахованою. Визначена зовнішня температура i -го шару ізоляції буде дорівнювати внутрішній температурі $(i+1)$ -го шару. Результати розрахунків наводять у вигляді табл. 4.2.

Наприклад, у секції випалу щільність теплового потоку становить 950 Вт/м², тоді для очікуваної зовнішньої температури першого шару шамоту (можна припустити будь-яку реальну температуру) 900 °С за формулою (4.2) одержують середню температуру: $t_{1.сеп} = (900 + 1100)/2 = 1000$ °С; потім розраховують середній коефіцієнт теплопровідності шару шамоту: $\lambda_1 = 0,7 + 0,00064 \cdot 1000 = 1,340$ Вт/(м·°С), і нарешті, за формулою (4.1) температуру зовнішньої поверхні шару шамоту:

$$t_{i.зоб} = 1100 - 950 \cdot \frac{0,115}{1,340} = 1\,018 \text{ °С}.$$

Наступним кроком припускають очікувану зовнішню температуру першого шару 1 018 °С і повторюють розрахунки доти, поки очікувана температура не дорівнюватиме розраховковій.

Аналогічним чином розраховують другий та третій шар ізоляції (табл. 4.2). Щільність теплового потоку при цьому залишиться незмінною.

Таблиця 4.2 – Розрахунки зовнішньої температури секції випалу

Очікувана температура, $t_{з\text{ов.оч}}, ^\circ\text{C}$	Середня температура, $t_{\text{сер}}, ^\circ\text{C}$	Коефіцієнт теплопровідності, $\lambda, \text{Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$	Розрахункова температура, $t_{з\text{ов.розр}}, ^\circ\text{C}$	Характеристика шару
1	2	3	4	5
$q_{\text{НС}} = 950 \text{ Вт}/\text{м}^2$				1-й шар: Ш-1,9; $\delta_1 = 0,115 \text{ м}$; $t_{1.\text{ВН}} = 1100 ^\circ\text{C}$; $t_{1.\text{ЗОВ}} = 1021 ^\circ\text{C}$; $\lambda_1 = 0,7 + 0,00064 \cdot t \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$
900	1000	1,340	1018	
1018	1059	1,378	1021	
1021	1061	1,379	1021	2-й шар: ШЛБ-0,6; $\delta_2 = 0,23 \text{ м}$; $t_{2.\text{ВН}} = 1021 ^\circ\text{C}$; $t_{2.\text{ЗОВ}} = 572 ^\circ\text{C}$; $\lambda_2 = 0,2 + 0,00036 \cdot t \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$
550	786	0,483	569	
569	795	0,486	572	
572	797	0,487	572	3-й шар: ПД-0,4; $\delta_3 = 0,115 \text{ м}$; $t_{3.\text{ВН}} = 572 ^\circ\text{C}$; $t_{3.\text{ЗОВ}} = -76 ^\circ\text{C}$; $\lambda_3 = 0,11 + 0,00023 \cdot t \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$
50	311	0,182	-30	
-30	271	0,172	-62	
-62	255	0,169	-76	

Отримана температура зовнішньої поверхні печі є негативною, тому розрахункова величина щільності теплового потоку має бути нижчою за $950 \text{ Вт}/\text{м}^2$. Припускають нове значення $q_{\text{НС}} = 890 \text{ Вт}/\text{м}^2$, після чого повторюють розрахунки. Орієнтовні значення $q_{\text{НС}}$ обирають у межах $890\text{--}200 \text{ Вт}/\text{м}^2$ у порядку зниження середніх температур у секціях печі.

Продовження табл. 4.2

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	
600	813	0,493	611	2-й шар: ШЛБ-600; $\delta_2 = 0,23 \text{ м}$; $t_{2.\text{ВН}} = 1026 ^\circ\text{C}$; $t_{2.\text{ЗОВ}} = 612 ^\circ\text{C}$; $\lambda_2 = 0,2 + 0,00036 \cdot t \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$
611	819	0,495	612	
612	819	0,495	612	
50	331	0,186	62	3-й шар: ПД-400; $\delta_3 = 0,115 \text{ м}$; $t_{3.\text{ВН}} = 612 ^\circ\text{C}$; $t_{3.\text{ЗОВ}} = 68 ^\circ\text{C}$; $\lambda_3 = 0,11 + 0,00023 \cdot t \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$
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 Вт/м^2 одержана температура зовнішньої поверхні $68 \text{ }^\circ\text{C}$ знаходиться у межах $(50\text{--}100) \text{ }^\circ\text{C}$, тому розрахунок вважається виконаний правильно.

Розрахунки видатків тепла в навколишнє середовище для цієї секції проводять за допомогою формули (4.3), кДж/год:

$$Q_{\text{НС}} = \frac{3,6 \cdot (t_{\text{ВН}} - t_{\text{ЗОВ}}) \cdot F_{\text{П}}}{\sum \left(\frac{\delta_i}{\lambda_i} \right)} = 3,6 \cdot q_{\text{НС}} \cdot F_{\text{П}}, \quad (4.3)$$

де $F_{\text{П}}$ – площа зовнішньої поверхні секції печі, яка розраховується за формулою (4.4), м^2 :

$$F_{\text{П}} = 2 \cdot L_{\text{П}} \cdot (K_{\text{П}} + H_{\text{П}}), \quad (4.4)$$

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

Для обраної печі (див. табл. 1.1) ширина пічного каналу дорівнює $0,9 \text{ м}$, висота пічного каналу $0,62 \text{ м}$, 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 $L_{\text{П}} = 3 \text{ м}$ (див. п. 3.2), площу зовнішньої поверхні секції випалу розраховують за формулою (4.4):

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

Коефіцієнт теплового опору ізоляції у секції випалу, значення якого можна використати для орієнтовного визначення $q_{\text{НС}}$, становитиме, $(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})/\text{Вт}$: $\sum(\delta_i/\lambda_i) = 0,115/1,380 + 0,230/0,495 + 0,115/0,188 = 1,16$.

Тоді видатки тепла в навколишнє середовище секцією випалу будуть становити за формулою (4.3):

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

Результати відповідних розрахунків для кожної секції печі наводять у вигляді табл. 4.3.

Таблиця 4.3 – Розрахунки видатків тепла в навколишнє середовище для секцій печі

Номер секції	Температура в печі, °C	Товщина ізоляції, м					$\sum(\delta_i/\lambda_i),$ (м ² ·°C)/Вт	$t_{зов},$ °C	$q_{нс},$ Вт/м ²	$K_{п},$ м	$H_{п},$ м	$F_{п},$ м ²	$Q_{нс},$ кДж/год
		Ш-1,9	ШЛБ-0,8	ШЛБ-0,6	ШЛБ-0,4	ПД-0,4							
1	400												
2	700												
3	950												
4	1100	0,115	-	0,230	-	0,115	1,16	68	890	1,82	1,54	20,16	64 593
5	925												
6	750												
7	575												
8	400												

Список літератури

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. Рапорт, 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. Кошкарёв В. Н. Тепловые установки : учебник / В. Н. Кошкарёв, А. А. Кучеренко. – Киев: Вища школа, 1990.
7. 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.
8. 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.
9. Драганов Б. Х. Теплотехніка / Б. Х. Драганов, А. А. Долинський, А. В. Мінденко, К. М. Письмений. – Київ: Вища школа, 2005.
10. Кошельник В. М. Основы проектирования теплотехнических установок предприятий промышленности строительных материалов : навч. посіб. / В. М. Кошельник, Ю. В. Шульгин, О. В. Кошельник, В. В. Соловей. – Харків: НТУ «ХП», 2010.
11. 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.
12. Сардак Е. М. Теплові процеси і агрегати в технології тугоплавких неметалевих та силікатних матеріалів : навч. посіб. / Е. М. Сардак, В. І. Голеус, О. В. Зайчук. – Дніпропетровськ: ДВНЗ УДХТУ, 2015. – 248 с.

ЗМІСТ

Вступ.....	3
1. Характеристика роликкових конвеєрних печей для виробництва плиток.....	3
1.1. Піч утильного випалу від лінії МРГП-500.....	6
1.2. Піч политого випалу від лінії МРГП-500.....	7
1.3. Роликові муфельні конвеєрні печі.....	10
2. Розрахунок температури горіння палива.....	12
3. Розрахунки режимів роботи та розподілення температур у печі	16
3.1. Розрахунок режиму роботи печі.....	16
3.2. Розрахунки розподілення температур у печі.....	17
4. Розрахунки видатків тепла у довкілля.....	22
Список літератури.....	27

Навчальне видання

Методичні вказівки

до виконання розрахункового завдання «Теплотехнічні розрахунки роликової конвеєрної печі для виробництва керамічних плиток» з курсу «Теплотехнічне обладнання підприємств» для студентів спеціальності 161 «Хімічні технології та інженерія» освітньої програми «Хімічні технології тугоплавких неметалевих і силікатних матеріалів» усіх форм навчання

Укладач НАГОРНИЙ Андрій Олегович

Роботу до видання рекомендувала *проф. Штефан В. В.*

Відповідальний за випуск *проф. Пітак Я. М.*

Редактор *О. І. Шпільова*

План 2020 р., поз. 144

Підп. до друку 25.09.2020 р. Формат 60 x 84^{1/16}. Ум. друк. арк. 1,8.
Гарнітура Times New Roman.

Видавничий центр НТУ «ХП»
Свідоцтво про державну реєстрацію ДК № 5478 від 21.08.2017 р.
61002, м. Харків, вул. Кирпичова, 2

Самостійне електронне видання