МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Київський національний університет

будівництва і архітектури

ТЕПЛОВІ ПРОЦЕСИ І УСТАНОВКИ

У ВИРОБНИЦТВІ БУДІВЕЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ І ВИРОБІВ

Методичні вказівки

до виконання практичних робіт

для студентів спеціальності 192 «Будівництво та цивільна інженерія»

спеціалізації «Технологія будівельних конструкцій,

виробів і матеріалів»

Київ – 2022

УДК

ББК

Укладачі:

В.П. Азутов, канд. техн. наук, доцент.

Рецензент О.Г. Гелевера, канд. техн. наук, доцент кафедри технології будівельних конструкцій і виробів.

Відповідальний за випуск В.І. Гоц, д-р техн. наук, професор.

Затверджено на засіданні кафедри технологій будівельних конструкцій і виробів, протокол № від 2022р.

Теплотехнічне обладнання.

Методичні вказівки до виконання практичних робіт / уклад:

В.П. Азутов, – К.: КНУБА, 2022р. – 21 с.

 Містить загальні положення, завдання та послідовність виконання практичних робіт щодо визначення параметрів теплових і массообмінних процесів в установках для теплової обробки будівельних матеріалів і конструкцій.

 Призначено для студентів спеціальності 192 специалізації „Технологія будівельних конструкцій, виробів і матеріалів” для використання теоретичного матеріалу при визначенні параметрів середовища та конструктивних і технологічних показників теплотехнічного обладнання.

©КНУБА, 2022

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Київський національний університет

будівництва і архітектури

ТЕПЛОВІ ПРОЦЕСИ І УСТАНОВКИ

У ВИРОБНИЦТВІ БУДІВЕЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ І ВИРОБІВ

Методичні вказівки

до виконання практичних робіт

для студентів спеціальності 192 «Будівництво та цивільна інженерія»

спеціалізації «Технологія будівельних конструкцій,

виробів і матеріалів»

 Всі цитати, цифровий

та фактичний матеріал,

бібліографічні відомості

перевірені. Написання

одиниць вимірювання

відповідає стандартам.

 Підписи авторів \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

 „\_\_\_\_”\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_2022 р.

 Гарант ОП “Технології будівельних конструкцій, виробів і матеріалів ” Гончар О.А.

 \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

 „\_\_\_\_”\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_2022 р.

Київ – 2022

Навчально-методичне видання

ТЕПЛОВІ ПРОЦЕСИ І УСТАНОВКИ

У ВИРОБНИЦТВІ БУДІВЕЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ І ВИРОБІВ

Методичні вказівки

до виконання практичних робіт

для студентів спеціальності 192 «Будівництво та цивільна інженерія»

спеціалізації «Технологія будівельних конструкцій,

виробів і матеріалів»

 Укладачі: АЗУТОВ Володимир Павлович

Загальні положення

Згідно з робочою програмою у процесі вивчення курсу «Теплові процеси і установки у виробництві будівельних матеріалів і виробів» студенти 2 і 3 курсів виконують практичні роботи за такими темами:

* теплові процеси при тепловологій обробці;
* теплові процеси при прогріванні заповнювачів;
* визначення термодинамічних параметрів атмосферного повітря;
* визначення аеродинамічного опору садки виробів.

Мета виконання практичних робіт – сприяти більш глибокому засвоєнню теоретичного матеріалу курсу «Теплові процеси і установки у виробництві будівельних матеріалів і виробів» з питань теплових і термодинамічних процесів в технології виробництва будівельних матеріалів і залізобетонних виробів

В процесі виконання практичних робіт студенти виконують розрахунки теплотехнічних показників робочого середовища та параметрів будівельних матеріалів, які піддаються тепловій обробці.

**Вправа № 1.** Властивості і процеси ідеального газу. Маса газу , кг із початковим тиском *p*1абс. = 0,1 МПа і початковою температурою *t*, оС стискається і зменшується в об’ємі в *ε* разів. Стиснення здійснюється по ізотермі, адіабаті, політропі з показником політропи *n*.

Визначити для кожного процесу:

* початковий і кінцевий об’єми газу;
* тиск і температуру газу наприкінці стиснення;
* зміну внутрішньої енергії, ентальпії і ентропії газу;
* роботу стиснення;
* кількість відведеної або підведеної теплоти в процесі.

Вказати, який процес стиснення є найбільш вигідним (по роботі, що витрачається).

Зобразити відносне розташування цих процесів в *pv*- і *Ts*-діаграмах. На графіках процесів вказати числові значення отриманих параметрів.

Рід газу, ступінь стиснення *ε* і початкову температуру вибрати за останньою цифрою шифру залік. кн. з табл. 1.1. Масу газу *m* і показник політропи *n* вибрати за передостанньою цифрою шифру. залік. кн.

Результати розрахунків звести в табл.1.2.

*Таблиця 1.1*

|  |  |
| --- | --- |
| Величина | Варіант |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 0 |
| Газ | Повітря | SO2 | N2 | He | Ne | CO | Ar | H2 | О2 | CH4 |
| *ε* | 17 | 6 | 9 | 11 | 8 | 15 | 14 | 4 | 7 | 13 |
| *t*, оС | 57 | 47 | 17 | 67 | 37 | 27 | 77 | 87 | 37 | 7 |
| *m*, кг | 6 | 5 | 7 | 9 | 5 | 11 | 20 | 13 | 15 | 14 |
| *n* | 1,55 | 1,15 | 1,2 | 1,25 | 1,3 | 1,35 | 1,45 | 1,5 | 1,6 | 1,1 |

#### *Таблиця 1.2*

|  |  |
| --- | --- |
| Процес | Розрахункові величини |
| *v*1,м3/кг | *v*2,м3/кг | *p*2,МПа | *t*2,оС | *L*,кДж | *Q*,кДж | Δ*U*,кДж | Δ*Н*,кДж | Δ*S*,кДж/К |
| Ізотермічний |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Адіабатний |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Політропний |  |  |  |  |  |  |  |  |  |

Приклад вибору завдання по останнім двом числам залікової книжки (шифру) для варіанту 75 для всіх завдань позначено жирним шрифтом.

**Вправа № 2.** Газова суміш задана в об’ємних долях, знаходиться в балоні ємністю *v*, м3 при тиску *p*1 і температурі 27˚С. Внаслідок випускання газу в атмосферу тиск в балоні падає до *p*2, а температура до 10˚С.

Визначити середню молекулярну масу суміші, газову постійну суміші, масу газу, випущену з балона в атмосферу, об’ємну теплоємність суміші (при *V=const*). Атмосферний тиск прийняти рівним 760 мм.рт.ст.

Необхідні дані взяти з табл. 2. Склад газової суміші в об’ємних долях взяти за останньою цифрою шифру, а *v*, *p*1, *p*2 - за передостанньою.

### Таблиця 2

.

|  |  |
| --- | --- |
| Величина | Варіант |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 3 | 8 | 9 | 0 |
| ,% | 12.0 | 10.1 | 10.2 | 6.3 | - | 47.5 | 6.6 | - | 13.8 | 4.9 |
| ,% | 3.3 | 12.2 | 17.5 | 11.9 | 10.4 | 13.4 | 4.0 | 18.1 | 4.6 | 6.3 |
| ,% | 80.7 | 72.7 | 70.3 | 75.8 | 81.2 | - | 86.4 | 76.2 | - | - |
| ,% | 4.0 | - | - | 6.0 | 2.2 | 25.0 | 3.0 | - | 40.0 | 60.0 |
| ,% | - | 5.0 | 2.0 | - | 6.2 | 14.1 | - | 5.7 | 41.6 | 28.8 |
| *v*, м3 | 4,0 | 5,1 | 16,2 | 8,3 | 25,4 | 12,4 | 3,6 | 9,3 | 14,8 | 27,9 |
| *p*1, МПа | 4,0 | 2,5 | 2,0 | 1,6 | 1,2 | 1,0 | 0,8 | 0,3 | 0,6 | 0,4 |
| *p*2, МПа | 1,0 | 0,8 | 0,6 | 0,4 | 0,3 | 0,2 | 0,1 | 0,08 | 0,06 | 0,02 |

**Вправа № 3.** Визначити питомі витрати теплоти (кількість теплоти, витрачену на *m* кг вологи) при сушці в теоретичній сушарці при таких умовах:

а) температура зовнішнього повітря *t,* відносна вологість *ϕ*;

б) температура повітря після калорифера *t*;

в) в процесі сушки (адіабатного насичення повітря водяною парою при *h* =Const) температура вологого повітря зменшується на Δ*t* = 10 оС;

Параметри повітря *t* і *ϕ* вибрати за останньою цифрою шифру, а , *m* – за передостанньою.

# *Таблиця 3*

|  |  |
| --- | --- |
| Величина | Варіант |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 3 | 8 | 9 | 0 |
| *,*оС | 25 | 20 | 15 | 30 | 25 | 10 | 35 | 20 | 15 | 10 |
| *ϕ*, % | 15 | 10 | 25 | 20 | 35 | 15 | 10 | 25 | 20 | 35 |
| , оС | 40 | 45 | 50 | 55 | 60 | 65 | 70 | 75 | 80 | 85 |
| *m,* кг | 0,1 | 0,2 | 0,3 | 0,4 | 0,5 | 0,6 | 0,7 | 0,8 | 0,9 | 1,0 |

Методика виконання розрахунково-графічних робіт

**Вправа 1**. Ізотермічний процес ().

1. З рівняння Клапейрона-Менделеєва : ; визначаємо *v1:*

,

де *R*-питома газова стала, .

1. Визначаємо питомий об’єм *v2* :



1. З рівняння процесу:  , визначаємо *p2:*



1. Визначаємо калоричні параметри процесу *ΔU*, *ΔH*:



.

1. Визначаємо питому роботу процесу:

.

1. Визначаємо питому кількість теплоти, необхідну для здійснення процесу:

,

де , тоді .

1. Визначаємо зміну питомої ентропії в процесі:

;

8. Визначаємо повні величини *L, Q, ΔS,* помноживши питомі величини *l,q,ds* на масу m.

9. Графіки ізотермічного процесу схематично зображуємо в *pv, Ts*-координатах

Адіабатний процес (;)

1. Аналогічно ізотермічному процесу з рівняння : ; визначаємо *v1.*

2. Аналогічно ізотермічному процесу визначаємо *v2.*

1. З рівняння стану процесу ; визначаємо *p2*:



де *k* – показник адіабати (коефіцієнт Пуассона), який має такі приблизні величини: для одноатомних газів-1,67; для двоатомних-1,4; для триатомних-1,29.

*k=*${с\_{р}}/{с\_{v}}$

1. Визначаємо питомі калоричні параметри процесу *Δh, Δu*:

,

де *сp-* масова ізобарна теплоємність газу, , визначаємо з додатку 3 за середньою температурою;

,

де - масова ізохорна теплоємність газу,, ;

1. Визначаємо питому роботу процесу:

.

6. Питома кількість теплоти в адіабатному процесі: *q*=0.

7. Зміна питомої ентропії в процесі: .

8. Визначаємо повні величини *L, ΔU, ΔH* аналогічно ізотермічному процесу.

9. Графіки адіабатного процесу схематично зображуємо в *pv, Ts*-координатах;

Політропний процес (*Сn=const*)

1. Аналогічно ізотермічному процесу з рівняння : ; визначаємо *v1.*

2. Аналогічно ізотермічному процесу визначаємо *v2.*

1. З рівняння стану процесу ; визначаємо *p2*:



1. Визначаємо питомі калоричні параметри процесу *Δh, Δu* аналогічно адіабатному процесу.
2. Визначаємо питому роботу процесу:

.

1. Питома кількість теплоти в адіабатному процесі:

 ,

де *cn –* теплоємність в політропному процесі, визначаємо за залежністю*:*

.

1. Зміна питомої ентропії в процесі визначаємо за залежністю:

.

8. Визначаємо повні величини *L, ΔU, ΔH, ΔS* аналогічно ізотермічному процесу.

9. Графіки політропного процесу схематично зображуємо в *pv, Ts*-координатах.

Зображення політропного процесу залежить від показника політропи *n* [ 1 ].

Розрахункові величини по всіх процесах зводимо в таблицю 1.2. Робимо висновок який процес стиснення є найбільш вигідним (по роботі, що витрачається).

**Вправа 2.**

1. Визначаємо середню молекулярну масу суміші (за залежностями, наведеними в додатку 1.)

2. Визначаємо газову сталу суміші ,

де - універсальна газова стала, .

3. Визначаємо об’ємну теплоємність суміші  (за залежностями, наведеними в додатку 1. Об’ємні теплоємності окремих газів визначаємо за додатком 4.

4. Визначаємо масу газу, випущену з балона в атмосферу.

Газова суміш міститься в балоні при *V=const*. Для різних станів суміші рівняння Клапейрона –Менделєєва має вигляд:

;

,

де Т- абсолютна температура. .

Розв’язавши обидва рівняння відносно мас, знаходимо величину:



**Вправа 3.**

При розрахунках сушарки спочатку виконують побудову процесів (*a-b* – нагрівання і *b-c* – сушки), що відбуваються у вологому повітрі на *hd* – діаграмі (додаток 2). За допомогою діаграми знаходять значення вологовмісту *d* і ентальпії *h* вологого повітря в характерних точках *a, b* і *c*, враховуючи, що *da*=*db*, а *hb* = *hc*. Знаходимо зростання вологовмісту повітря:

, г / кг сухого повітря.

Вологовміст повітря збільшується за рахунок видаленої з матеріалу вологи, причому, цю кількість вологи відбирає 1 кг повітря. Це дає можливість знайти масу повітря, необхідну для видалення 1 кг вологи з матеріалу:

, кг повітря.

Кількість теплоти, витрачена на нагрівання 1 кг повітря:

, кДж /кг сухого повітря.

Загальна кількість теплоти, витрачена на нагрівання *M* кг повітря:

, кДж.

**Вправа 4**

Визначити опір газового тракту, виходячи з таких даних:

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Номер варіанту | Довжина, м | Темпера-тура газів, оС | Темпера-тура повітря, оС | Висота каналу, м | Швид-кість газів,ω, м/с | Попе-речний переріз, мм(a х в) | Місце-вий опір (кільк прямих кутів) |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| 1 | 20 | 200 | -20 | 10 | 2,0 | 200х300 | 5 |
| 2 | 40 | 250 | -15 | 15 | 2,5 | 200х400 | 6 |
| 3 | 60 | 300 | -10 | 20 | 3,0 | 300х400 | 7 |
| 4 | 80 | 350 | -5 | 25 | 3,5 | 300х500 | 8 |
| 5 | 100 | 400 | 0 | 30 | 4,0 | 400х400 | 9 |
| 6 | 110 | 450 | +5 | 35 | 4,5 | 400х500 | 10 |
| 7 | 120 | 500 | +10 | 40 | 5,0 | 400х600 | 11 |
| 8 | 130 | 550 | +15 | 45 | 5,5 | 500х500 | 12 |
| 9 | 140 | 600 | +20 | 50 | 6,0 | 500х600 | 13 |
| 10 | 150 | 650 | +25 | 55 | 6,5 | 500х700 | 14 |

Розв`язання вправи передбачає визначення повного аеродинамічного опору теплової установки або її вентиляційних систем.

Склад роботи і послідовність виконання.

1.Складання схеми повітропроводів і вентиляційних каналів.

2. Визначення опору ходу повітря і газів.

Для виконання роботи викреслюється схема газоходів і повітропроводів із зазначенням довжин і розмірів ділянок.

Опір руху повітря і газів складається із витрат на тертя і місцевого опору.

Витрати на тертя в прямих каналах Ртер залежать від їх довжин і поперечного перерізу, динамічного тиску і дослідного коефіцієнту тертя, який залежить від жорсткості каналу й числа Рейнольдса, Н/м2:

$Р\_{тер}=β\frac{l}{d}\frac{ϑ^{2}}{2}P\_{0}\left(1+t\_{2}/273\right)\left[\left(t\_{2}+273\right)/\left(t\_{ст}+273\right)\right]$*0,573* (1)

За відсутності теплового обміну на відрізку останній множник опускається.

При русі у каналі не круглого перерізу замість діаметру ставиться еквівалентний діаметр:

*de=4f/P,* (2)

де *f* – площа перерізу, м2; *Р*- периметр каналу, м.

Для каналів прямокутного перерізу *de*= 2ав/(а+в), число Рейнольдса

$Re= \frac{ωl}{ν}$*, де* $ν$ - кінематичний коефіцієнт в'язкості газів, м2/с, який залежить від температури.

Втрати місцевих опорів, Н/м2:

*Рм=ξ·ρ0·ω2*/2·(1+*t*/273) (3)

Таблиця місцевих опорів *ξ* наведена в [1, с.54, рис.9].

Самотяга являє собою геометричний тиск вертикального або похилого відрізків газоходу. Її розраховують за формулою, Н/м2:

$Р\_{с}=Н∙g\left(\frac{ρ\_{оп}}{1+^{t\_{1}}/\_{273}}-\frac{ρ\_{ог}}{1+^{t\_{2}}/\_{273}}\right)$, (4)

Де *Н* – висота каналу, м; $ρ\_{оп}$ - густина повітря, кг/м3, *t1* – температура повітря, *t2* – температура газу, ºС.

Самотяга допомогає руху газів і перешкоджає йому, якщо газ проходить вниз вертикальною ділянкою.

Загальний опір руху газів теплової установки визначають як суму затрат місцевих і на тертя:

*Рз = ƩРтер + ƩРм + ƩРс* (5)

Приклад роз'вязання **вправи №4**

Визначити опір прямокутного каналу *ℓ* = 40 м перерізом 500х300 мм, якщо наведена швиідкість руху газів *ω*=2 м/с при *t* = 300 ºС, кількість прямих кутів – 5.

Вертикальний канал висотою 50 м, температура повітря +20 ºС. Густина повітря і газів відповідно $ρ\_{оп}$ = 1,2 кг/м3, $ρ\_{ог}$ = 1,3 кг/м3

За умовами прикладу *Рсад*= 0. Затрати на тертя за довжиною газоходу визначають за формулою (1).

Для цегляних каналів *β* = 0,05.

Для металевих повітряпроводів *β* = 0,045.

Еквівалентний діаметр

*de =* 2*ab/(a+b)* = 2·0,6·0,3/(0,5+0,3) = 0,376

Густина повітря $ρ$ = 1.2 кг/м3

*Ртер* = 0,05 ·40/0,376 ·4,2 ·1,2 (1+300/273) = 26 Н/м2

Місцеві опори, Н/м2:

*Рм=Ʃξ·ω2*/2·$ ρ$o(1+*t*2/273)=1,2·5·4/2(1+300/273)=30,4 Н/м2

*Рс*=509,8[1,2/(1+20/273) - 1,3/(1+500/273)]=364 Н/м2

Загальний опір

*Рз=Ртер+Рм+Рс*=26,0+30,4+364=42,04 Н/м2

Вправа 5

Визначити температурні параметри у бетоні виробу під час теплової обробки виходячи з таких даних:

Виріб: ребриста панель з розмірами в мм:

* довжина – 6820, ширина – 3280, товщина – 310;
* об'єм бетону у виробі 3,14 м3
* щільність бетону ρ= 2400 кг/м3
* коефіцієнт теплопровідності λ =1,56 Вт/(м·ºС)
* коеф. теплоємності с= 0,84 кДж/(кг·ºС)
* бетон В15;

Методика виконання **вправи 5**

Завдання розв’язуємо за таким порядком:

Виходячи з типу залізобетонного виробу, його об’єму, геометричних розмірів визначаємо приведену товщину виробу, яка буде позначатись як 2R, тому що температура визначається у центрі виробу, тобто на відстані від поверхні як R. Для суцільних виробівце буде просто товщина, а для просторових і ребристих розрахункова товщина буде визначатись поділенням об’єму виробу на його площу.

Визначаємо режим ТВО за нормативними документами, а також з підручнику [3 табл.4…10]:

τ1+τ2+τ3.,

де τ1; τ2; τ3 – відповідно часи підйому температури, ізотермічного витримування і охолодження в тепловому агрегаті (год.)

Загальна тривалість циклу ТВО τц визначається як:

τц=τзав.+ τпопер.+τ1+τ2+τ3 +τраз , (1)

де -τзав τпопер τраз –час на завантаження, попереднього витримування і розвантаження теплового агрегату

Після цього визначаємо температурні параметри у бетоні виробу під час теплової обробки на практичному прикладі:

1. Режим ТВО визначаємо за нормативними документами:

В нашому випадку це:

 τ1+τ2+τ3=3+5+2=10 год.

1. Загальна тривалість циклу ТВО:

 τц=τзаг.+ τпред.+τ1+τ2+τ3 +τраз.= 0,5+1+(3+5+2)+0,5=12год.

*3.Технологічний розрахунок установки.*

1. Розрахункова товщина виробу 2R=0,14м; (3,14/6,82/3,28); R=0,07м
2. Швидкість підйому температури середовища в камері 21,67 ºС/год. Протягом 3 годин;

де 20 і 85 температури початкова (у цеху) і максимальна при ізотермічному витримуванні, ºС;

1. Кількість годин, яка прийнята для визначення температури у середовищі камери під час обробки виробів по стадіям, год: τ1-і=1 год.
2. Температура середовища в кінці кожної стадії, ºС t"1-i= t'1-i+;

Де t'1-i – температура середовища на початку стадії.

 t"1-1=20+21,67 ·1=41,67ºС

 t"1-2=41,67+21,67 ·1=63,34ºС

 t"1-3=63,34+21,67 ·1=85,01ºС

1. Середня температура середовища в стадії: ŧ1-і=0,5(t'1-i+ t"1-i)

 ŧ1-1=0,5( 20+41,67)=30,835 ºС

 ŧ1-1=0,5(41,67+63,34)= 52,505 ºС

 ŧ1-1=0,5(63,34+85,01)= 74,175 ºС

Виходячи з вище викладених розрахунків будуємо графік ТВО (рис.1)



Рис. 1 Графік ТВО

Для нестаціонарного режиму, який характеризується зміною температур точок тіла за часом з використанням критерії Фур’є і Біо.визначаємо температурні параметри центру вироба і на його поверхні по стадіях за допомогою графіків (рис. 22) [1] (див. додаток).

*1.Період нагріву*

Перша стадія

1. Критерій Віо: Ві1-1==70·0,07/1,56=6,28
2. Критерій Фур'є: F0=α·τ/R2=0,0028·1/0,07 2=0,571

α=3,6·λм/(с·ρ)= 3,6·1,56/(0,84·2400)=0,0028

1. Безрозмірна температура θц=0,52; θп=0,13
2. Температура центра виробу в кінці стадії:

tц1-1= ŧ1-1- θц(ŧ1-1-t1)= 30,835-0,52 (30,835-20)=25,2 ºС

1. Температура поверхні виробу в кінці стадії:

tп1-1= ŧ1-1- θп(ŧ1-1-t1)= 30,835-0,13 (30,835-20)=29,43 ºС

1. Середня температура виробу в кінці стадії:

 ŧб1-1=0,67· tц+0,33· tп= 0,67·25,2+0,33·29,43=26,6ºС

Друга стадія

1. Критерій Віо: Ві1-1==90·0,07 /1,56=4,04
2. Критерій Фур'є: F0=α·τ/R2=0,0028·1/0,07 2=0,57

 α=3,6·λм/(с·ρ)= 3,6·1,56/(0,84·2400)=0,0028

3. Безрозмірна температура θц=0,53; θп=0,18

4. Температура центра виробу в кінці стадії:

 tц1-2= ŧ1-2- θц(ŧ1-2-t1-1)= 52,505 -0,53 (52,505 -25,2)=38,03 ºС

5. Температура поверхні виробу в кінці стадії:

 tп1-2= ŧ1-2- θп(ŧ1-2-t1-1)= 52,505 –0,18 (52,505 –29,43)=48,35 ºС

6. Середня температура виробу в кінці стадії:

 ŧб1-2=0,67· tц+0,33· tп= 0,67·38,03 +0,33·48,35=41,44ºС

Третя стадія

1. Критерій Віо: Ві1-1==110·0,07/1,56=4,94

2. Критерій Фур'є: F0=α·τ/R2=0,0028·1/0,072=0,57

 α=3,6·λм/(с·ρ)= 3,6·1,56/(0,84·2400)=0,0028

3. Безрозмірна температура θц=0,55; θп=0,17

4. Температура центра виробу в кінці стадії:

 tц1-3= ŧ1-3- θц(ŧ1-3-t1-2)= 74,175 -0,55 (74,175 -38,03)=54,3 ºС

5. Температура поверхні виробу в кінці стадії:

 tп1-3= ŧ1-3- θп(ŧ1-3-t1-2)= 74,175 –0,17(74,175 -48,35)=69,78 ºС

6. Середня температура виробу в кінці стадії:

 ŧб1-3=0,67· tц+0,33· tп= 0,67·54,3 +0,33·69,78 =58,8 ºС

*2. Період ізотермічного витримування*

1. Критерій Віо: Ві1-1==120·0,07/1,56=5,38

2. Критерій Фур'є: F0=α·τ/R2=0,0028·4/0,072=2,28

 α=3,6·λм/(с·ρ)= 3,6·1,56/(0,84·2400)=0,0028

3. Безрозмірна температура θц=0,1; θп=0,05

4. Температура центра виробу в кінці стадії:

 tц2= ŧ2- θц(ŧ2-tц1-3)= 85 -0,1 (85 -54,3)=81,93 ºС

5. Температура поверхні виробу в кінці стадії:

 tп2= ŧ2- θп(ŧ2-tп1-3)= 85 –0,05(85 -69,78)=84,24 ºС

6. Середня температура виробу в кінці стадії:

 ŧб2=0,67· tц+0,33· tп= 0,67·81,93 +0,33·84,24 =82,69ºС

На базі графіку ТВО (рис.1) будуємо графіки зміни температурних параметрів у виробі в центрі та на його поверхні.

Додатки

# Додаток 1

# Розрахункові залежності для газових сумішей

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **Заданий склад суміші** | **Визначуваний склад суміші** | **Середня молярна маса суміші,****μс, кг/кмоль** | **Питома газова стала суміші,*****Rс*, Дж/(кг·К)** |
| **Масовий**  |  |  |  |
| **Об’ємний** | **Масовий** |  |  |

Додаток 2

Ентальпія H, кДж / кг сухого повітря

 Рп, мм рт. ст.

**Вологовміст d, г/кг сухого повітря**

Hd – діаграма вологого повітря

Додаток 3

## Середня масова теплоємність газів при сталому тиску

**cp, кДж/(кг·К)**

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **t, оС** | **О2** | **N2** | **СО** | **СО2** | **H2О** | **Н2** | **SO2** | **Повітря** |
| **0** | **0,9148** | **1,0304** | **1,0396** | **0,8148** | **1,8594** | **14,195** | **0,607** | **1,0036** |
| **100** | **0,9232** | **1,0316** | **1,0417** | **0,8658** | **1,8728** | **14,353** | **0,636** | **1,0061** |
| **200** | **0,9353** | **1,0346** | **1,0463** | **0,9102** | **1,8937** | **14,421** | **0,662** | **1,0115** |
| **300** | **0,9500** | **1,0400** | **1,0538** | **0,9487** | **1,9192** | **14,446** | **0,687** | **1,0191** |
| **400** | **0,9651** | **1,0475** | **1,0634** | **0,9826** | **1,9477** | **14,477** | **0,708** | **1,0283** |
| **500** | **0,9793** | **1,0567** | **1,0748** | **1,0128** | **1,9778** | **14,509** | **0,724** | **1,0387** |
| **600** | **0,9927** | **1,0668** | **1,0861** | **1,0396** | **2,0092** | **14,542** | **0,737** | **1,0496** |
| **700** | **1,0048** | **1,0777** | **1,0978** | **1,0639** | **2,0419** | **14,587** | **0,754** | **1,0605** |
| **800** | **1,0157** | **1,0881** | **1,1091** | **1,0852** | **2,0754** | **14,641** | **0,762** | **1,0710** |
| **900** | **1,0258** | **1,0982** | **1,1200** | **1,1045** | **2,1097** | **14,706** | **0,775** | **1,0815** |
| **1000** | **1,0350** | **1,1078** | **1,1304** | **1,1225** | **2,1430** | **14,776** | **0,783** | **1,0907** |

## Додаток 4

## Середня об’ємна теплоємність газів при сталому об’ємі

**c’v, кДж/(м3·К)**

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **t, оС** | **О2** | **N2** | **СО** | **СО2** | **H2О** | **Н2** | **SO2** | **Повітря** |
| **0** | **0,9349** | **0,9236** | **0,9282** | **1,2288** | **1,1237** | **0,9056** | **1,361** | **0,9261** |
| **100** | **0,9466** | **0,9249** | **0,9307** | **1,3293** | **1,1342** | **0,9198** | **1,440** | **0,9295** |
| **200** | **0,9642** | **0,9286** | **0,9362** | **1,4164** | **1,1514** | **0,9261** | **1,516** | **0,9362** |
| **300** | **0,9852** | **0,9357** | **0,9458** | **1,4918** | **1,1715** | **0,9282** | **1,587** | **0,9462** |
| **400** | **1,0065** | **0,9454** | **0,9579** | **1,5587** | **1,1945** | **0,9311** | **1,645** | **0,9579** |
| **500** | **1,0270** | **0,9567** | **0,9718** | **1,6178** | **1,2188** | **0,9341** | **1,700** | **0,9718** |
| **600** | **1,0459** | **0,9692** | **0,9864** | **1,6701** | **1,2439** | **0,9370** | **1,742** | **0,9856** |
| **700** | **1,0634** | **0,9826** | **1,0011** | **1,7174** | **1,2703** | **0,9412** | **1,779** | **0,9998** |
| **800** | **1,0789** | **0,9960** | **1,0153** | **1,7601** | **1,2971** | **0,9458** | **1,813** | **1,0132** |
| **900** | **1,0936** | **1,0086** | **1,0287** | **1,7982** | **1,3247** | **0,9516** | **1,842** | **1,0262** |
| **1000** | **1,1056** | **1,0207** | **1,0417** | **1,8326** | **1,3519** | **0,9579** | **1,867** | **1,0387** |

Додаток 5

Молекулярні маси газів, µ, кг/моль

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| О2-32,00 | N2-28,026 | СО-28,01 | He-4,003 | Ne-20,17 |
| Н2-2,016 | SO2-64,06 | СН4-16,032 | Ar-39,994 | Повітря-28,96 |
| Н2О-18,016 | CО2-44,01 | NH3-17,032 |  |  |

Додаток 6

