


Теплові процеси при окускуванні:

методичні рекомендації до виконання
індивідуальних завдань

Запоріжжя 2026



УДК 622.785:536(072)
Т34

Рекомендовано Науково-методичною
радою ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ
ПОЛІТЕХНІКА»
(протокол № 7 від 04.06.2026 р.)

Укладачі

Біляєва В. В., д-р техн. наук, професор,

Т34 Теплові процеси при окускуванні : методичні рекомендації до виконання індивідуальних завдань (для студентів спеціальності G10 «Металургія» усіх форм навчання) / уклад. В. В. Біляєва, Запоріжжя : ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА». 2026. 29 с.

Методичні рекомендації містять відомості щодо формування індивідуальних завдань з дисципліни «Теплові процеси при окускуванні», теоретичні відомості з наведенням основних формул та етапів розв'язання. Крім цього наводяться довідкові дані та індивідуальні варіанти завдань. Матеріал методичних рекомендацій має на меті підвищити якість виконання роботи та виробити навички розв'язання задач прикладного спрямування. Рекомендовано для студентів спеціальності G10 «Металургія» усіх форм навчання першого (бакалаврського) рівня вищої освіти.

УДК 622.785:536(072)

© ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», 2026



ЗМІСТ

Вступ.....	4
1 Індивідуальна робота №1.....	5
Завдання 1.1	5
1.1.1 Загальні положення і формулювання завдання.....	5
1.1.2 Аналітичні розв'язки рівняння нестационарної теплопровідності для тіл простої геометричної форми ...	6
1.1.3 Порядок виконання завдання.....	9
1.1.4 Довідкові дані і варіанти завдання.....	11
Завдання 1.2.....	13
1.2.1 Загальні положення і формулювання завдання.....	13
1.2.2 Розрахунок тепловіддачі під час обтікання сферичних тіл..	14
1.2.3 Порядок виконання завдання.....	16
1.2.4 Довідкові дані і варіанти завдання.....	16
2 Індивідуальна робота №2.....	18
Завдання 2.1	18
2.1.1 Загальні положення і формулювання завдання.....	18
2.1.2 Порядок виконання завдання.....	22
2.1.3 Довідкові дані і варіанти завдання.....	22
Завдання 2.2.....	25
2.2.1 Загальні положення і формулювання завдання.....	25
2.2.2 Порядок виконання завдання.....	25
2.2.3 Довідкові дані і варіанти завдання.....	26
Рекомендована література.....	28

ВСТУП

Теплові процеси при окускуванні – це вибіркова дисципліна професійного спрямування освітньої програми «Металургія чорних металів» спеціальності G10 «Металургія», яка дозволяє опанувати теоретичні відомості про теплові процеси, що відбуваються при окускуванні сировини металургійного виробництва, зокрема, спіканні залізородного агломерату та обпалі окатишів, для того, щоб чітко розуміти хід відповідних технологічних процесів та прогнозувати фізико-хімічні властивості їх продуктів. Дисципліна розглядає термінологію, понятійний апарат та особливості тепло- та масообмінних процесів, які відбуваються під час теплової та термічної обробки залізородних матеріалів, а також методи розрахунку теплового балансу процесів для різних сировинних умов, а також для різних зон технологічних агрегатів. Отримані знання та навички можуть бути застосовані в професійній діяльності для розуміння впливу факторів технологічних процесів на показники якості окускованої сировини.

У межах опанування курсу студенти виконують індивідуальні завдання, присвячені сучасним проблемам енергетичного сектора промисловості, що сприяють формуванню практичних навичок енергоефективного й екологічно орієнтованого інжинірингу.

Запропоновані методичні рекомендації містять опис порядку формування завдань, теоретичні положення з основними формулами та етапами розв'язання, а також довідкові матеріали й індивідуальні варіанти. Їх використання спрямоване на підвищення якості виконання робіт і розвиток умінь розв'язувати інженерні задачі прикладного характеру.

Індивідуальні завдання виконуються самостійно у зручний для студента час в межах терміну подачі роботи, передбачених у розділі «Розподіл балів за контрольними точками та графік їх виконання» та розміщується у відповідному розділі на платформі Moodle. Розв'язання кожного завдання завантажується у вигляді файлу з розширенням .docx або .pdf, або .jpg, або .png, або .txt.

Максимальна кількість балів визначається в залежності від обґрунтування ходу розв'язання, рівня формалізації задачі, правильності отриманого розв'язку та аналізу результату.

Використання штучного інтелекту (ШІ) не забороняється, оскільки пропозиції відомих застосунків ШІ суттєво залежать від обміркованої постановки питання і уточнюючих питань; однак в разі, якщо відповідь, отримана з використанням ШІ, містить суттєві похибки або не є комплексною, або не відповідає за усталеним оформленням, термінологією, або іншим вимогам до завдання, то оцінка за виконання знижується.

За бажання студента при наявності похибок або виконання індивідуального завдання не в повному обсязі допускається доопрацювання до передостаннього тижня навчання. Оскарження оцінки за індивідуальні завдання є можливим до завершення терміну теоретичного навчання.

1 ІНДИВІДУАЛЬНА РОБОТА №1

Завдання 1.1

Завдання 1.1 присвячено дослідженню процесів нестационарної теплопровідності у тілах, що піддаються нагріву у печах, на прикладі металевого бруска зазначеного розміру.

1.1.1 Загальні положення і формулювання завдання

У процесах окускування залізорудної сировини, зокрема під час агломерації та виробництва окатків, важливу роль відіграють теплові процеси, що відбуваються всередині частинок і агломератів матеріалу. Нагрівання шихтових матеріалів у технологічних агрегатах супроводжується складними явищами теплопереносу, які, як правило, мають нестационарний характер. Це пов'язано з тим, що температура газового середовища, інтенсивність теплообміну та тепловий стан самого матеріалу постійно змінюються з часом. У таких умовах температурне поле в частинках матеріалу формується поступово, що зумовлює необхідність аналізу саме нестационарних процесів теплопровідності.

Нестационарний характер теплопровідності проявляється у тому, що температура в різних точках твердого тіла змінюється з часом нерівномірно. Під час нагрівання зовнішні шари матеріалу швидше сприймають теплову енергію від навколишнього середовища, тоді як внутрішні області прогріваються повільніше. У результаті всередині твердого тіла виникає температурний градієнт, який поступово зменшується у міру проникнення тепла вглиб матеріалу. Вивчення таких процесів є важливим для оцінки швидкості нагрівання частинок та прогнозування температурного стану матеріалу на різних етапах технологічного процесу.

У промислових умовах частинки рудної сировини, агломерату або окатків піддаються інтенсивному тепловому впливу з боку гарячих газів у печах, сушильних установках та агломераційних машинах. Тепло передається від газового середовища до поверхні частинок шляхом конвективного теплообміну, після чого поширюється всередину матеріалу завдяки теплопровідності. Оскільки нагрівання відбувається протягом певного проміжку часу, розподіл температури в об'ємі матеріалу постійно змінюється, що ще раз підкреслює нестационарний характер цих процесів.

Для інженерного аналізу теплового стану матеріалів у технологічних агрегатах часто застосовують спрощені геометричні моделі, які дозволяють описати процеси нагрівання за допомогою рівнянь нестационарної теплопровідності. Однією з таких моделей є розгляд нагрівання твердого бруска в умовах дії гарячого газового

середовища. Подібна схема розрахунку дає можливість оцінити розподіл температури у характерних точках тіла: у центрі, поблизу граней або на поверхні; а також визначити зміну температурного стану матеріалу з часом.

Розрахунок температурного поля в твердому тілі при нагріванні дозволяє визначити температури в різних характерних точках бруска, зокрема у його центрі та всередині граней, а також оцінити середню температуру матеріалу через заданий проміжок часу. Отримані результати можуть використовуватися для аналізу теплових умов нагрівання матеріалів та кращого розуміння процесів прогрівання частинок у технологічних агрегатах, що застосовуються під час окускування рудної сировини.

Формулювання завдання. Брус металу розмірами $300 \times 200 \times 150$ (рис. 1.1) мм з початковою температурою $22 \text{ }^\circ\text{C}$ нагрівають у печі, де температура атмосфери $t_{жс}$, а коефіцієнт тепловіддачі α (див. табл. 1.2). Знайти температуру у центрі бруска, всередині кожної грані, а також середню безрозмірну та розмірну температури через інтервал часу τ . Теплопровідність матеріалу бруска $\lambda = 35 \text{ Вт/(м К)}$, коефіцієнт температуропровідності $6.25 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$.

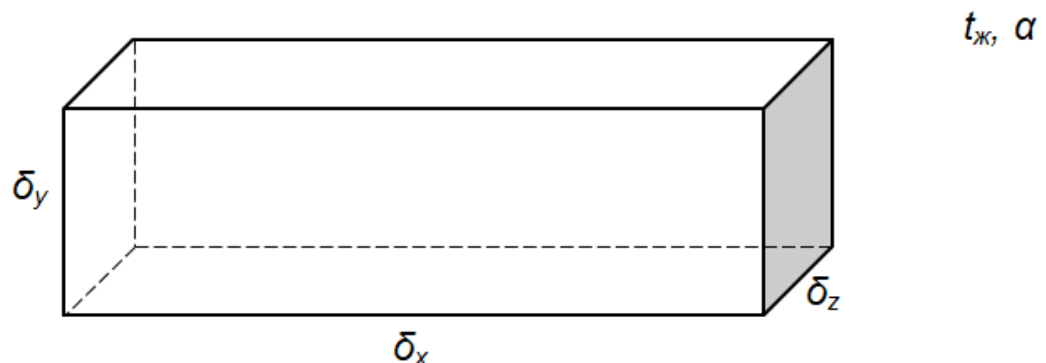



Рис. 1.1. Схема бруску металу, що нагрівається у печі

1.1.2 Аналітичні розв'язки рівняння нестационарної теплопровідності для тіл простої геометричної форми

Під час нагрівання або охолодження твердих тіл температура всередині матеріалу змінюється з часом і координатами. Такі процеси називають нестационарними процесами теплопровідності. Температурне поле в цьому випадку описується функцією

$$T = T(x, y, z, t).$$



Поширення теплоти в твердому тілі описується рівнянням нестационарної теплопровідності (рівнянням Фур'є)

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right)$$

де a – коефіцієнт температуропровідності.

Для розв'язання задач необхідно задати:

- початкову умову – розподіл температури в початковий момент часу;
- граничні умови – теплообмін на поверхні тіла.

У більшості практичних задач теплообмін на поверхні описується законом Ньютона–Ріхмана

$$q = \alpha(T_{сер} - T_{пов}),$$

що приводить до граничної умови третього роду

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \alpha(T_{нов} - T_{сер}).$$

Для узагальнення результатів використовують безрозмірні параметри. Серед них:

- безрозмірна температура

$$\theta = \frac{T - T_{сер}}{T_0 - T_{сер}}$$

де T – температура в точці тіла; T_0 – початкова температура; $T_{сер}$ – температура середовища.

- число Фур'є, що характеризує відносний час прогрівання тіла

$$Fo = \frac{at}{L^2},$$

де a – температуропровідність; t – час; L – характерний розмір тіла. Фізично число Фур'є показує, наскільки далеко встигло поширитися тепло всередині матеріалу за певний час.

- число Біо, що характеризує співвідношення теплових опорів

$$Bi = \frac{\alpha L}{\lambda},$$

де α – коефіцієнт тепловіддачі; λ – коефіцієнт теплопровідності. Мале число Біо означає майже рівномірну температуру всередині тіла, тоді як великі значення Біо відповідають значним температурним градієнтам.

Аналітичні розв'язки рівняння теплопровідності отримують методом розділення змінних. У результаті розв'язання виникає характеристичне рівняння, корені якого називають власними числами.

Для задач із конвективним теплообміном на поверхні вони визначаються з рівняння

$$\mu_n \tan \mu_n = Bi.$$

Корені цього рівняння ($\mu_1, \mu_2, \mu_3 \dots$) визначають швидкість згасання окремих членів ряду. У більшості практичних задач достатньо враховувати лише перший член.

Розглянемо аналітичні розв'язки рівняння нестационарної теплопровідності для тіл простої геометричної форми.

– *нагрівання необмеженої пластини.* Розглянемо пластину товщиною $2L$. Температурне поле для цього випадку має вигляд

$$\theta = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos(\mu_n x / L) \exp(-\mu_n^2 Fo),$$

де x – координата; A_n – коефіцієнти розкладу.

Коефіцієнти визначаються за формулою

$$A_n = \frac{4 \sin \mu_n}{2\mu_n + \sin 2\mu_n}.$$

Температура у центрі пластини

$$\theta_0 = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \exp(-\mu_n^2 Fo).$$

– *нагрівання нескінченного циліндра.* Для циліндра радіуса R температурне поле описується

$$\theta = \sum_{n=1}^{\infty} A_n J_0(\mu_n r / R) \exp(-\mu_n^2 Fo),$$

де J_0 – функція Бесселя нульового порядку; r – радіальна координата.

Коефіцієнти A_n розраховуються наступним чином

$$A_n = \frac{2}{\mu_n J_1(\mu_n)},$$

де J_1 – функція Бесселя першого порядку.
Температура у центрі циліндра

$$\theta_0 = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \exp(-\mu_n^2 Fo).$$

– нагрівання кулі. Для кулі радіуса R розв'язок має вигляд

$$\theta = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \frac{\sin(\mu_n r / R)}{r / R} \exp(-\mu_n^2 Fo).$$

Коефіцієнти A_n розраховуються так

$$A_n = \frac{4 \sin \mu_n}{2 \mu_n - \sin 2 \mu_n}.$$

Температура в центрі кулі

$$\theta_0 = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \exp(-\mu_n^2 Fo)$$

Наведені аналітичні розв'язки дозволяють визначати температуру в різних точках твердого тіла під час його нагрівання або охолодження. Для тіл складнішої форми, наприклад прямокутного паралелепіпеда, температурне поле може бути визначене методом суперпозиції рішень для пластин у трьох взаємно перпендикулярних напрямках.

Такі залежності широко використовуються при розрахунках теплових режимів у металургійних печах, сушильних установках, агрегатах термічної обробки матеріалів, а також у технологічних процесах нагрівання рудної сировини та агломераційних матеріалів.

1.1.3 Порядок виконання завдання

Як було наведено вище, нестационарні процеси теплопровідності описуються диференціальними рівняннями в часткових похідних. Розв'язок таких рівнянь в загальному випадку має досить складний для

обчислень вигляд (нескінченні ряди, містять квадратури). Проте для окремих випадків (постійних та ізотропних теплофізичних властивостях, сталих граничних умовах та для великих значень часу) визначальні вирази для температури та теплових потоків можуть бути спрощені й використані для оцінки теплового стану твердого тіла.

Для паралелепіпеда зі сторонами δ_x , δ_y , δ_z (рис.1.1), якщо значення числа $Fo > 0.3$ температурне поле визначається на підставі теореми добутку

$$\Theta = \frac{t - t_{жс}}{t_0 - t_{жс}} = F_1(Fo_x, Bi_x, \frac{x}{\delta_x}) \cdot F_2(Fo_y, Bi_y, \frac{y}{\delta_y}) \cdot F_3(Fo_z, Bi_z, \frac{z}{\delta_z}), \quad (1.1)$$

де відповідні безрозмірні критерії визначаються за формулами

$$Fo_x = \frac{\alpha\tau}{\delta_x^2}, Bi_x = \frac{\alpha\delta_x}{\lambda}, Fo_y = \frac{\alpha\tau}{\delta_y^2}, Bi_y = \frac{\alpha\delta_y}{\lambda}, Fo_z = \frac{\alpha\tau}{\delta_z^2}, Bi_z = \frac{\alpha\delta_z}{\lambda}. \quad (1.2)$$

Функції, що входять до виразу (1.1) мають вигляд

$$F_1 = N_1 \cos\left(\mu_{11} \frac{x}{\delta_x}\right) \cdot \exp(-\mu_{11}^2 Fo_x),$$

$$F_2 = N_2 \cos\left(\mu_{12} \frac{y}{\delta_y}\right) \cdot \exp(-\mu_{12}^2 Fo_y),$$

$$F_3 = N_3 \cos\left(\mu_{13} \frac{z}{\delta_z}\right) \cdot \exp(-\mu_{13}^2 Fo_z).$$

Власні числа μ та множники N визначаються в залежності від числа Біо (див. таблицю 1.1).

Середня безрозмірна температура може бути обчислена за формулою

$$\bar{\Theta} = \bar{\Theta}_x \bar{\Theta}_y \bar{\Theta}_z = f_1(Fo_x, Bi_x) \cdot f_2(Fo_y, Bi_y) \cdot f_3(Fo_z, Bi_z),$$

де функції f_j обчислюються

$$f_j = \frac{2Bi_j^2}{\mu_{1j}^2(\mu_{1j}^2 + Bi_j^2 + Bi_j)} \cdot \exp(-\mu_{1j}^2 Fo_j).$$

Порядок виконання завдання наступний:

1. Визначити безрозмірні критерії Фур'є та Біо за виразами (1.2).
2. Переконатися, що числа Фур'є задовольняють умові використання (1.1). За таблицею 1.1 визначити власні числа μ та множники N .
3. Підставляючи значення всіх розрахованих параметрів та координати точок в (1.1) визначити безрозмірні та розмірні температури у вказаних точках, а також середні температури.

1.1.4 Довідкові дані і варіанти завдання

При виконанні завдання прийняти щодо розрахунків наступні параметри з таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 - До нестационарної теплопровідності пластин товщиною 2δ (коефіцієнти для розрахунку охолодження/нагрівання)

Bi	μ_1	μ_1^2	P	N
0,01	0,0998	0,0100	0,997	1,002
0,02	0,1410	0,0199	0,933	1,003
0,04	0,1987	0,0397	0,987	1,006
0,06	0,2425	0,0584	0,981	1,010
0,08	0,2791	0,0778	0,974	1,013
0,10	0,3111	0,0968	0,967	1,016
0,12	0,3397	0,1154	0,960	1,020
0,14	0,3656	0,1337	0,954	1,023
0,16	0,3896	0,1518	0,948	1,026
0,18	0,4119	0,1697	0,942	1,029
0,20	0,4328	0,1874	0,936	1,031
0,22	0,4525	0,2048	0,930	1,043
0,24	0,4713	0,2220	0,924	1,037
0,26	0,4889	0,2390	0,918	1,040
0,28	0,5058	0,2558	0,912	1,042
0,30	0,5218	0,2723	0,906	1,045
0,35	0,5590	0,3125	0,891	1,052
0,40	0,5932	0,3516	0,877	1,058
0,45	0,6240	0,3899	0,863	1,064
0,50	0,6533	0,4264	0,849	1,070
0,55	0,6800	0,462	0,836	1,076
0,60	0,7051	0,497	0,823	1,081
0,70	0,7506	0,564	0,798	1,092
0,80	0,7910	0,626	0,774	1,102
0,90	0,8274	0,684	0,751	1,111
1,00	0,8603	0,740	0,729	1,119
1,20	0,9171	0,841	0,689	1,134
1,40	0,9649	0,931	0,653	1,148
1,60	1,0008	1,016	0,619	1,159
1,80	1,0440	1,090	0,587	1,169

Bi	μ_1	μ_1^2	P	N
2,00	1,0769	1,160	0,559	1,179
2,20	1,1054	1,222	0,535	1,186
2,40	1,1300	1,277	0,510	1,193
2,60	1,1541	1,322	0,488	1,200
2,80	1,1747	1,380	0,468	1,205
3,00	1,1925	1,420	0,448	1,210
3,20	1,2330	1,520	0,406	1,221
4,00	1,2646	1,590	0,370	1,229
5,00	1,3138	1,73	0,314	1,240
6,00	1,3496	1,82	0,273	1,248
7,00	1,3766	1,90	0,241	1,254
8,00	1,3978	1,95	0,216	1,257
9,00	1,4149	2,00	0,196	1,260
10,00	1,4289	2,04	0,180	1,262

Варіанти завдань наведено в табл. 1.2. Слідкуйте за розмірністю величин в розрахункових формулах і в завданні.

Таблиця 1.2- Варіанти завдання 1.1

Номер варіанту	Температура атмосфери $t_{ж}$, °C	Коефіцієнт тепловіддачі α Вт/(м ² К)	Інтервал часу τ , год
1	1220	120	1,5
2	1000	150	1,2
3	900	160	2
4	770	175	2,2
5	1000	190	1,5
6	850	200	1,5
7	1100	220	1,2
8	900	230	2
9	770	250	1,5
10	680	120	1,2
11	900	150	2
12	770	160	1,5
13	1000	175	1,2
14	850	190	2
15	1100	200	2,5
16	1220	220	1,5
17	1000	230	1,2
18	900	250	2
19	770	160	2,2
20	1000	175	1,5
21	850	190	1,5
22	1100	200	1,2
23	900	220	2
24	770	230	1,5
25	680	250	1,2



Завдання 1.2

Завдання 1.2 присвячено дослідженню процесу тепловіддачі при обтіканні агломераційної гранули газовим потоком.

1.2.1 Загальні положення і формулювання завдання

У процесах окускування дрібнодисперсних матеріалів, зокрема під час агломерації, важливу роль відіграють явища теплопереносу між газовим середовищем і твердими частинками. У шарі агломераційної шихти відбувається інтенсивний тепло- та масообмін, що визначає швидкість нагріву гранул, перебіг фізико-хімічних перетворень і, зрештою, якість готового продукту. Особливе значення має дослідження теплообміну між окремими гранулами та потоком гарячих газів, який проходить крізь шар матеріалу.

Одним із базових підходів до аналізу таких процесів є розгляд теплообміну для окремої сферичної частинки, що обтікається газовим потоком. Незважаючи на спрощений характер такої моделі, вона дозволяє отримати інженерно обґрунтовані оцінки коефіцієнта тепловіддачі та виявити вплив основних параметрів процесу, зокрема швидкості газу, температурного рівня та фізичних властивостей середовища.

У даному індивідуальному завданні розглядається теплообмін при обтіканні одиночної агломераційної гранули гарячим газовим потоком. Основною метою є визначення середнього коефіцієнта конвективної тепловіддачі на основі критеріальних залежностей теорії теплообміну. Отримані результати можуть бути використані для подальшого аналізу теплового стану шару матеріалу та оптимізації режимів роботи агломераційних установок.

Формулювання завдання. В умовах процесу окускування дрібнодисперсного матеріалу в агломераційній установці відбувається процес нагріву гранул у потоці гарячих газів.

Розглядається одиночна сферична гранула агломерату діаметром d , мм, яка знаходиться у рівномірному потоці газової суміші (повітря) з температурою T_∞ , К. Гранула має початкову температуру T_w , К, і обтікається потоком газу зі швидкістю w , м/с.

Необхідно визначити середній коефіцієнт конвективної теплоотдачі α між газовим потоком і поверхнею гранули. Потік газу вважається стаціонарним, рівномірним на вході, таким, що обтікає ізольовану сферу. Властивості газу змінні, але враховуються через усереднення по температурі.

1.2.2 Розрахунок тепловіддачі під час обтікання сферичних тіл

Куля є типовим прикладом сферичного, погано обтічного тіла, яке не має вираженого напрямку обтікання (рис.1.2).

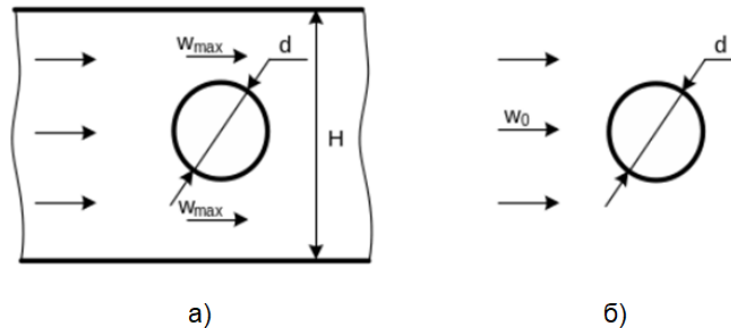


Рис. 1.2. Обтікання сферичного тіла у обмеженому (а) та у необмеженому потоці (б)
 $w_{max}=w_0$ – швидкість набігання у потоці; d – діаметр сферичного тіла; H – ширина потоку

Характер течії газу навколо кулі суттєво відрізняється від обтікання пластин або циліндрів і супроводжується раннім відривом прилежого шару та утворенням вихрової зони позаду тіла.

Гідродинамічні особливості обтікання кулі описуються залежністю коефіцієнта опору від числа Рейнольдса. Коефіцієнт опору визначається як:

$$\xi = \frac{2F}{\rho w^2 \Omega}, \quad (1.3)$$

де F – сила гідродинамічного опору, ρ – густина газу, w – швидкість потоку, Ω – характерна площа поперечного перерізу. Для кулі ця площа дорівнює $\Omega = \pi R_0^2$, де R_0 – радіус кулі.

Число Рейнольдса, яке визначає режим течії, обчислюється за діаметром кулі:


$$Re = \frac{\rho d w}{\mu} \quad (1.4)$$

або

$$Re = \frac{d w}{\nu}, \quad (1.5)$$

де $d=2R_0$ – діаметр кулі, μ – коефіцієнт динамічної в'язкості; ν – коефіцієнт кінематичної в'язкості газу.

У області малих чисел Рейнольдса ($Re < 2$) рух газу має ламінарний характер і описується законом Стокса:


$$F = 6\pi\mu R_0 w; \quad \xi = \frac{24}{Re}. \quad (1.6)$$

Зі зростанням числа Рейнольдса відбувається поступове зменшення коефіцієнта опору, а в діапазоні приблизно $2 \cdot 10^3 < Re < 2 \cdot 10^5$ він змінюється незначно. Така поведінка пояснюється відривом ламінарного примежового шару від поверхні кулі та формуванням за нею вихрової (турбулентної) зони. У цій зоні відбувається інтенсивне перемішування газу, що суттєво впливає як на гідродинамічні характеристики, так і на теплообмін.

При подальшому збільшенні числа Рейнольдса спостерігається так звана криза опору, яка пов'язана із переходом примежового шару в турбулентний стан до точки відриву. Це призводить до зміщення точки відриву вниз за потоком і, відповідно, до різкої зміни опору та структури течії.

Аналогічні особливості течії визначають і процес теплообміну. У граничному випадку, коли швидкість потоку прямує до нуля ($Re \rightarrow 0$, $w \rightarrow 0$), теплообмін між кулею та середовищем здійснюється лише за рахунок теплопровідності від сферичного джерела, зануреного в необмежене однорідне середовище, і відповідне мінімальне значення числа Нуссельта становить:

$$Nu_{\min} = 2.$$

Це значення відповідає тепловіддачі від сферичного джерела тепла в нерухомому середовищі.

На основі узагальнення численних експериментальних даних для ізотермічного обтікання кулі отримано емпіричну залежність для визначення числа Нуссельта:

$$Nu = 2 + 0,03 Pr^{0,33} Re^{0,51} + 0,35 Pr^{0,35} Re^{0,58}. \quad (1.7)$$

Ця формула враховує внесок різних механізмів теплообміну: теплопровідності (перший доданок) та конвективного переносу в умовах ламінарного і перехідного режимів течії (другий і третій доданки). Вона є універсальною для широкого діапазону чисел Рейнольдса та широко застосовується в інженерних розрахунках.

При розміщенні кулі в осьовому потоці струменя спостерігається інший характер обтікання, що залежить від співвідношення діаметрів струменя і кулі. Експериментальні дослідження показують, що коефіцієнт опору в цьому випадку змінюється залежно від відносного діаметра струменя, а також від температурного фактора. Встановлено, що при малих числах Рейнольдса вплив температурного фактора може бути істотним і навіть протилежним за напрямком порівняно з

обтіканням у необмеженому середовищі. Водночас у розвиненому режимі течії цей вплив зменшується, і характеристики процесу визначаються переважно гідродинамічними параметрами.

1.2.3 Порядок виконання завдання

1. Розраховується визначальна температура за формулою:

$$T_{сер} = \frac{T_{\infty} + T_w}{2},$$

де T_{∞} – температура газового потоку (повітря), К, T_w – температура поверхні гранули, К,

2. За знайденою температурою $T_{сер}$ за таблицею 1.3 з довідковими даними визначаються: густина газу ρ , кг/м³, коефіцієнт динамічної в'язкості μ , Па·с, коефіцієнт кінематичної в'язкості ν , м²/с, коефіцієнт теплопровідності λ , Вт/(м·К), число Прандтля Pr .

3. Обчислюється число Рейнольдса для випадку обтікання сферичного тіла за формулами (1.4) або (1.5). Характерні розміри гранул підставляються у вказані формули у одиницях системи СІ.

4. За формулою (1.7) розраховується критерій Нуссельта.

5. Коефіцієнт тепловіддачі α обчислюється за допомогою наступної залежності:

$$\alpha = \frac{Nu \lambda}{d}.$$

1.2.4 Довідкові дані і варіанти завдання

Теплофізичні параметри повітря, що обтікає гранули агломерату, наведені в табл. 1.3.

Таблиця 1.3 - Фізичні властивості сухого повітря (p=101 кПа)

t, °C	ρ , кг/м ³	c_p , кДж/(кг·°C)	$\lambda \cdot 10^2$, Вт/(м·°C)	$\nu \cdot 10^6$, м ² /с	$\mu \cdot 10^6$, Па·с	$\nu \cdot 10^6$, м ² /с	Pr
0	1,293	1,005	2,44	18,8	17,2	13,28	0,707
10	1,247	1,005	2,51	20,0	17,6	14,16	0,705
20	1,205	1,005	2,59	21,4	18,1	15,06	0,703
30	1,165	1,005	2,67	22,9	18,6	16,00	0,701
40	1,128	1,005	2,76	24,3	19,1	16,96	0,699
50	1,093	1,005	2,83	25,7	19,6	17,95	0,698
60	1,060	1,005	2,90	26,2	20,1	18,97	0,696
70	1,029	1,009	2,96	28,6	20,6	20,02	0,694
80	1,000	1,009	3,05	30,2	21,1	21,09	0,692
90	0,972	1,009	3,13	31,9	21,5	22,10	0,690
100	0,946	1,009	3,21	33,6	21,9	23,13	0,688
120	0,898	1,009	3,34	36,8	22,8	25,45	0,686
140	0,854	1,013	3,49	40,2	23,7	27,80	0,684

$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$c_p, \text{кДж/(кг}\cdot^\circ\text{C)}$	$\lambda \cdot 10^2, \text{Вт/(м}\cdot^\circ\text{C)}$	$a \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$	$\mu \cdot 10^6, \text{Па}\cdot\text{с}$	$\nu \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$	Pr
160	0,815	1,017	3,64	43,9	24,5	30,09	0,682
180	0,779	1,022	3,78	47,5	25,3	32,49	0,681
200	0,746	1,028	3,93	51,4	26,0	34,85	0,680
250	0,674	1,038	4,27	61,0	27,4	40,61	0,677
300	0,615	1,047	4,60	71,6	29,7	48,33	0,674
350	0,566	1,059	4,91	81,9	31,4	55,46	0,676
400	0,524	1,068	5,21	93,1	33,0	63,09	0,678
500	0,456	1,093	5,74	115,3	36,2	79,38	0,687
600	0,404	1,114	6,22	138,3	39,1	96,89	0,699
700	0,362	1,135	6,71	163,4	41,8	115,4	0,706
800	0,329	1,156	7,18	188,8	44,3	134,8	0,713
900	0,301	1,172	7,63	216,2	46,7	155,1	0,717
1000	0,277	1,185	8,07	245,9	49,0	177,1	0,719
1100	0,257	1,197	8,50	276,2	51,2	199,3	0,722
1200	0,239	1,210	9,15	316,5	53,5	233,7	0,724

Варіанти завдань наведено в табл. 1.4. Слідкуйте за розмірністю величин в розрахункових формулах і в завданні.

Таблиця 1.4 - Варіанти індивідуального завдання 1.2

№ вар	$d, \text{(мм)}$	$w, \text{(м/с)}$	$T_\infty, \text{(K)}$	$T_w, \text{(K)}$
1	5	1	600	300
2	6	2	700	450
3	7	3	800	400
4	8	4	900	350
5	9	5	1000	500
6	10	6	1100	550
7	11	7	1200	535
8	12	8	1150	600
9	13	9	1050	700
10	14	10	950	650
11	15	1	850	750
12	16	2	750	800
13	17	3	650	900
14	18	4	600	850
15	19	5	700	875
16	20	6	800	775
17	21	7	900	725
18	22	8	1000	675
19	23	9	1100	650
20	24	10	1200	575
21	25	1	1150	550
22	23	2	1050	525
23	21	3	950	400
24	19	4	850	450
25	17	5	750	375

2 ІНДИВІДУАЛЬНА РОБОТА №2

Завдання 2.1

Під час окусування відбуваються складні процеси переносу маси й енергії, серед яких дифузія є одним з найважливіших. Саме завдяки дифузійним явищам здійснюється рух вологи, газів або окремих компонентів матеріалу всередині гранули, що визначає швидкість і рівномірність прогріву, якість висушування та формування структури майбутнього окатиша.

Коефіцієнт дифузії – це кількісна характеристика, що показує, наскільки інтенсивно відбувається переміщення частинок речовини під дією різниці концентрацій. Іншими словами, він відображає здатність речовини передавати масу з області більшої концентрації до області меншої. У технологічних процесах окусування цей коефіцієнт відіграє вирішальну роль, оскільки саме від нього залежить швидкість сушіння, випалу, дегазації, а також рівномірність розподілу компонентів усередині гранули.

Метою виконання цього індивідуального завдання є закріплення знань щодо теплових процесів при окуванні, зокрема на знаходження коефіцієнта дифузії.

Значення коефіцієнта дифузії залежить від багатьох факторів. Найважливішим серед них є температура. Із її підвищенням частинки починають рухатися інтенсивніше, бар'єри між ними зменшуються, і процес переносу речовини відбувається швидше. Саме тому у високотемпературних стадіях окусування швидкість дифузії значно більша, ніж у процесі сушіння. Окрім температури, важливими чинниками є агрегатний стан середовища, розмір частинок, ступінь пористості гранули, вміст вологи, а також склад зв'язувальних речовин, які можуть створювати на поверхні частинок додаткові плівки та уповільнювати рух молекул.

2.1.1 Загальні положення і формулювання завдання

Передача речовини в газі через ламінарний примежовий шар (підшар) здійснюється молекулярною дифузією. Для задач, що мають відношення до горіння, істотна концентраційна дифузія, а термодифузією можна знехтувати (однак її слід врахувати при горінні водню). Не проявляється і бародифузія, оскільки загальний тиск не змінюється. Щільність потоку речовини, що переноситься молекулярною дифузією при постійній температурі в бінарній суміші ідеальних (нешільних) газів, у системі центру мас виражається формулою

$$\mathbf{g}_1 = -\frac{M_1 M_2 p D_{12}}{M_{\text{сум}} RT} \text{grad} \frac{p_1}{p} = -\rho D_{12} \text{grad} Z_1 = -\mathbf{g}_2 \quad (2.1)$$

де $p = p_1 + p_2$ – загальний тиск суміші; p_1, p_2 – парціальні тиски компонентів; M_1, M_2 – їх молекулярні маси;

$M_{\text{сум}} = M_1 \frac{p_1}{p} + M_2 \frac{p_2}{p} = (M_1 - M_2) \frac{p_1}{p} + M_2$ – молекулярна маса суміші;

$\rho = \frac{M_{\text{сум}} p}{RT}$ – густина суміші;

$Z_1 = \frac{M_1 p_1}{M_{\text{сум}} p}$ – відносна масова концентрація першого компонента (для

другого компонента $Z_2 = 1 - Z_1$);

$D_{12} = D_{21}$ – коефіцієнт взаємної дифузії компонентів.

Формула (2.1) справедлива і в неізотермічному випадку, якщо знехтувати термодифузією. З урахуванням термодифузії

$$\mathbf{g}_1 = -\frac{M_1 M_2 p D_{12}}{M_{\text{сум}} RT} \left(\text{grad} \frac{p_1}{p} + \frac{k_T}{T} \text{grad} T \right) = -\mathbf{g}_2 \quad (2.2)$$

де k_T – термодифузійне відношення. Величина k_T додатна (при не дуже низьких температурах), якщо індексом 1 позначати більш важкий компонент (або компонент з більшими розмірами молекул). Термодифузійний потік цього компонента спрямований у бік більш низьких температур (проти градієнта температури). Термодифузійний потік другого компонента спрямований зустрічно (і дорівнює термодифузійному потоку першого компонента).

Згідно з висновками кінетичної теорії Енскога та Чепмена

$$D_{12} = 2,66 \cdot 10^{-2} \frac{\sqrt{T^3 (M_1 + M_2) / (2 M_1 M_2)}}{p \sigma_{12}^2 \Omega^{(1,1)*}(T^*)}, \quad (2.3)$$

де $T^* = kT / \varepsilon_{12}$, ε_{12} , σ_{12} – параметри функції, що виражає потенціальну енергію взаємодії молекул першого та другого компонентів; k – стала Больцмана; $\Omega^{(1,1)*}(T^*)$ – приведений інтеграл взаємодії (зіткнень) молекул першого та другого компонентів. Тиск p підставляється у формулу (2.3) у паскалях, ε_{12} у джоулях, σ_{12} в ангстремах, величина D_{12} виходить у м²/с.

З достатньою для практики точністю у розрахунках можна використовувати модель Леннарда-Джонса, за якою потенціальна енергія взаємодії в залежності від відстані між молекулами r виражається формулою

$$\varphi_{12}(r) = 4\varepsilon_{12} \left[\left(\frac{\sigma_{12}}{r} \right)^{12} - \left(\frac{\sigma_{12}}{r} \right)^6 \right]. \quad (2.4)$$

Величина σ_{12} виражається через величини σ_1 і σ_2 (близькі до діаметрів молекул першого та другого компонентів) як середнє арифметичне

$$\sigma_{12} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2}, \quad (2.5)$$

а величина ε_{12} через величини ε_1 і ε_2 для компонентів – як середнє геометричне

$$\varepsilon_{12} = \sqrt{\varepsilon_1 \varepsilon_2}. \quad (2.6)$$

Значення інтеграла $\Omega^{(1,1)*}(T^*)$, обчисленого з використанням потенціалу Леннарда-Джонса, наводяться для деяких значень T^* у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 - Значення приведених інтегралів $\Omega^{(1,1)*}(T^*)$ і $\Omega^{(2,2)*}(T^*)$ при використанні потенціалу Леннарда-Джонса

T^*	$\Omega^{(1,1)*}$	$\Omega^{(2,2)*}$	T^*	$\Omega^{(1,1)*}$	$\Omega^{(2,2)*}$
0,5	2,066	2,257	7,0	0,7896	0,8727
1,0	1,439	1,587	8,0	0,7712	0,8538
1,5	1,198	1,314	9,0	0,7556	0,8379
2,0	1,075	1,175	10	0,7424	0,8242
2,5	0,9996	1,093	20	0,6640	0,7432
3,0	0,9490	1,039	30	0,6232	0,7005
3,5	0,9120	0,9999	50	0,5756	0,6504
4,0	0,8836	0,9700	100	0,5130	0,5882
4,5	0,8610	0,9464	200	0,4644	0,5320
5,0	0,8422	0,9269	400	0,4170	0,4811
6,0	0,8124	0,8963			

Кінетична теорія Енскога і Чепмена призводить і до формул для динамічної в'язкості [у Па·с = кг/(м·с)] та теплопровідності газів [у Вт/(м·К)]:

$$\mu = 2,67 \cdot 10^{-6} \frac{\sqrt{MT}}{\sigma^2 \Omega^{(2,2)*}(T^*)}; \quad (2.7)$$

$$\lambda = 8,32 \cdot 10^{-2} \frac{\sqrt{T/M}}{\sigma^2 \Omega^{(2,2)*}(T^*)}. \quad (2.8)$$

Тут σ , $T^* = kT/\epsilon$, ϵ відносяться до чистих газів. Величина σ підставляється в ангстремах.

Значення інтеграла $\Omega^{(2,2)*}(T^*)$ при використанні потенціалу Леннарда-Джонса також наводяться в таблиці 2.1. Для найпростішої моделі, де молекули розглядаються як тверді сфери, $\Omega^{(1,1)*} = \Omega^{(2,2)*} \equiv 1$. При цьому не забезпечується необхідна точність розрахунків D_{12} , μ і λ . При розрахунку теплопровідності багатоатомних газів до формули (2.8) необхідна поправка на вплив внутрішніх ступенів свободи обертання молекул і коливання в них атомних ядер. Поправочний множник Ейкена має вигляд

$$K = \frac{4c_v}{15R} + \frac{3}{5}, \quad (2.9)$$

де c_v – молярна теплоємність при постійному об'ємі.

Маючи експериментальні значення в'язкості або теплопровідності чистих газів (в'язкість визначається в досліді значно точніше, тому переважніше використовувати дані з в'язкості), можна за допомогою формули (2.7) або (2.8) і таблиці або формули для $\Omega^{(2,2)*}(T^*)$ визначити параметри σ і ϵ для газів (значення σ і ϵ для деяких газів наводяться в таблиці 2.2). Потім ці величини можна використовувати в розрахунках коефіцієнта дифузії D_{12} , застосовуючи формули (2.5) і (2.6) для визначення σ_{12} і ϵ_{12} . Зіставлення з наявними дослідними даними показує, що похибки подібного роду розрахунків не перевищують 5-7%, тобто не виходять за межі точності дослідів. Розрахунок теплопровідності та в'язкості за формулами (2.7) і (2.8) також відповідає точності дослідів.

Таблиця 2.2 - Значення величин σ і ϵ для деяких газів

Газ	σ , Å	ϵ/k , К	Газ	σ , Å	ϵ/k , К
H_2	2,92	38,0	CH_4	3,80	144,0
Повітря	3,69	84,0	C_2H_5OH	4,46	391,0
N_2	3,75	79,8	C_6H_6	5,27	440,0
O_2	3,54	88,0	C_6H_{14}	5,91	413,0
CO	3,71	88,0	Ізооктан C_8H_{18}	7,79	428,0
CO_2	3,90	213,0			

Крім теоретичних формул для коефіцієнта дифузії та інших коефіцієнтів переносу є також ряд напівемпіричних формул. Такі формули зручні для приведення коефіцієнта дифузії від однієї температури до іншої.

Формулювання завдання. Провести розрахунок коефіцієнта дифузії для сумішей, вказаних у таблиці з варіантами до індивідуального завдання, при температурі T , К та атмосферному тиску $P=1,01 \cdot 10^5$ Па. Привести коефіцієнти дифузії до тисків P_1 , Па та P_2 , Па.

2.1.2 Порядок виконання завдання

1. Визначаємо параметри σ , Å, ϵ/k , К та M , кг/кмоль для кожного газу, що входить до складу суміші, з таблиць 2.2 та 2.3 відповідно.

2. Визначаємо параметр T^* за формулою $T^* = kT / \epsilon_{12}$, де ϵ_{12} визначається за формулою (2.6).

3. За визначеним параметром T^* відповідно до даних табл. 2.1 знаходимо значення приведенного інтегралу зіткнень $\Omega^{(1,1)*}$.

4. За формулою (2.5) знаходимо величину σ_{12} , що виражається через величини σ_1 і σ_2 .

5. За формулою (2.3) знаходимо коефіцієнт дифузії суміші газів.

2.1.3 Довідкові дані і варіанти завдання

Довідкові дані. У таблиці 2.3 наводяться молярні маси, густини, молярні об'єми за нормальних умов та газові постійні деяких газів.

Таблиця 2.3 - Молярні маси, густини, молярні об'єми за нормальних умов та газові постійні найважливіших газів

Речовина	Хімічне позначення	Молярна маса μ , кг/кмоль	Густина ρ , кг/м ³	Молярний об'єм v_μ , м ³ /кмоль	Газова постійна R , Дж/(кг·К)
Повітря	–	28,96	1,293	22,40	287,0
Кисень	O ₂	32,00	1,439	22,39	259,8
Азот	N ₂	28,026	1,251	22,40	296,8
Атмосферний азот	N ₂	28,16	1,257	22,40	295,3
Гелій	He	4,003	0,179	22,42	2078,0
Аргон	Ar	39,994	1,783	22,39	208,2
Водень	H ₂	2,016	0,090	22,43	4124,0

Речовина	Хімічне позначення	Молярна маса μ , кг/кмоль	Густина ρ , кг/м ³	Молярний об'єм V_{μ} , м ³ /кмоль	Газова постійна R , Дж/(кг·К)
Оксид вуглецю	CO	28,01	1,250	22,40	296,8
Вуглекислий газ	CO ₂	44,01	1,977	22,26	188,9
Діоксид сірки	SO ₂	64,06	2,926	21,89	129,8
Метан	CH ₄	16,032	0,717	22,39	518,8
Етилен	C ₂ H ₄	28,052	1,251	22,41	296,6
Коксовий газ	–	11,50	0,515	22,33	721,0
Аміак	NH ₃	17,032	0,771	22,08	488,3
Водяна пара	H ₂ O	18,016	0,804	22,40	461

Варіанти завдання наведено в табл. 2.4. Слідкуйте за розмірністю величин в розрахункових формулах і в завданні.

Таблиця 2.4 - Варіанти індивідуального завдання 2.1

Номер варіанту	Суміш	T, К	P ₁ , Па	P ₂ , Па
1	кисень – азот кисень – вуглекислий газ	1000	1,01·10 ⁶	1,01·10 ⁴
2	окис вуглецю – азот окис вуглецю – кисень	1100	1,01·10 ⁷	1,01·10 ³
3	вуглекислий газ – азот вуглекислий газ – кисень	1200	1,01·10 ⁸	1,01·10 ⁴
4	кисень – окис вуглецю діоксид сірки – азот	1300	1,01·10 ⁷	1,01·10 ⁴
5	кисень – азот кисень – вуглекислий газ	1400	1,01·10 ⁶	1,01·10 ⁴
6	окис вуглецю – азот окис вуглецю – кисень	1500	1,01·10 ⁷	1,01·10 ³
7	вуглекислий газ – азот вуглекислий газ – кисень	1600	1,01·10 ⁸	1,01·10 ²
8	кисень – окис вуглецю діоксид сірки – азот	1700	1,01·10 ⁶	1,01·10 ⁴
9	кисень – азот кисень – вуглекислий газ	1800	1,01·10 ⁷	1,01·10 ³
10	окис вуглецю – азот	1900	1,01·10 ⁸	1,01·10 ²

Номер варіанту	Суміш	T, K	P ₁ , Па	P ₂ , Па
	окис вуглецю – кисень			
11	вуглекислий газ – азот вуглекислий газ – кисень	2000	1,01·10 ⁷	1,01·10 ⁴
12	кисень – окис вуглецю діоксид сірки – азот	2100	1,01·10 ⁶	1,01·10 ³
13	кисень – азот кисень – вуглекислий газ	2200	1,01·10 ⁸	1,01·10 ⁴
14	окис вуглецю – азот окис вуглецю – кисень	2300	1,01·10 ⁶	1,01·10 ⁴
15	вуглекислий газ – азот вуглекислий газ – кисень	2400	1,01·10 ⁷	1,01·10 ³
16	кисень – окис вуглецю діоксид сірки – азот	2500	1,01·10 ⁸	1,01·10 ²
17	кисень – азот кисень – вуглекислий газ	1150	1,01·10 ⁶	1,01·10 ⁴
18	окис вуглецю – азот окис вуглецю – кисень	1250	1,01·10 ⁷	1,01·10 ³
19	вуглекислий газ – азот вуглекислий газ – кисень	1350	1,01·10 ⁸	1,01·10 ²
20	кисень – окис вуглецю діоксид сірки – азот	1450	1,01·10 ⁶	1,01·10 ³
21	кисень – азот кисень – вуглекислий газ	1550	1,01·10 ⁷	1,01·10 ⁴
22	окис вуглецю – азот окис вуглецю – кисень	1650	1,01·10 ⁷	1,01·10 ³
23	вуглекислий газ – азот вуглекислий газ – кисень	1750	1,01·10 ⁸	1,01·10 ²
24	кисень – окис вуглецю діоксид сірки – азот	1850	1,01·10 ⁶	1,01·10 ⁴
25	кисень – азот кисень – вуглекислий газ	1950	1,01·10 ⁷	1,01·10 ⁴



Завдання 2.2

Завдання 2.2 пов'язане із розрахунком коефіцієнту теплопровідності газів з урахуванням внутрішніх обертальних та коливальних ступенів свободи для багатоатомних молекул.

2.2.1 Загальні положення і формулювання завдання

У процесах окискування залізородної сировини важливу роль відіграють теплові явища, що визначають умови нагрівання, сушіння, спікання та формування міцної структури агломерату або окатишів. Ефективність цих процесів значною мірою залежить від інтенсивності теплообміну між газовим середовищем і шаром матеріалу. У промислових агрегатах для окискування передача теплоти здійснюється переважно за рахунок конвекції, теплопровідності та випромінювання. Тому для правильного опису теплових процесів необхідно знати теплофізичні властивості газів, зокрема коефіцієнт теплопровідності.


Газове середовище, що контактує з шаром шихти під час окискування, може мати різний склад залежно від технологічних умов процесу. Воно може включати повітря, продукти згоряння палива або їх суміші. При цьому температура газів у робочому просторі агрегатів змінюється в широких межах – від декількох сотень до кількох тисяч кельвінів. За таких умов теплофізичні властивості газів істотно залежать від температури, тому для інженерних розрахунків важливо враховувати зміну коефіцієнта теплопровідності в широкому температурному інтервалі.

Згідно з кінетичною теорією газів, перенесення теплоти в газовому середовищі відбувається внаслідок хаотичного руху молекул, які переносять енергію між різними ділянками потоку. Інтенсивність цього процесу визначається як властивостями самого газу, так і його термодинамічним станом. Для більш точного визначення коефіцієнта теплопровідності використовують різні уточнюючі співвідношення, які враховують вплив внутрішніх ступенів свободи молекул на перенесення енергії.

Одним із таких уточнень є поправка Ейкена, яка дозволяє врахувати внесок внутрішньої енергії молекул у процес теплопереносу. Вона пов'язує коефіцієнт теплопровідності газу з його в'язкістю та теплоємністю при сталому об'ємі.

Урахування цієї поправки особливо важливе при високих температурах, коли зростає роль внутрішніх ступенів свободи молекул і змінюється теплоємність газу. Внаслідок цього коефіцієнт теплопровідності може суттєво змінюватися зі зростанням температури.

Таким чином, визначення коефіцієнта теплопровідності газів у широкому діапазоні температур є важливою складовою аналізу



теплових процесів при окускуванні. Отримані результати використовуються під час розрахунків теплових потоків у шарі матеріалу, побудови математичних моделей теплообміну та оптимізації температурних режимів роботи технологічних агрегатів. Це дозволяє підвищити ефективність теплових процесів, зменшити витрати палива та забезпечити необхідну якість готової продукції.

Формулювання завдання. Розрахувати теплопровідність газу (відповідно до варіанту у табл. 2.5) при температурі T, K . При обчисленні поправки Ейкена прийняти c_v для визначеного газу відповідно до температури.

2.2.2 Порядок виконання завдання

1. Визначаємо параметри $\sigma, \text{Å}, \varepsilon/k, K$ та $M, \text{кг/кмоль}$ для заданого газу з таблиць 2.2 та 2.3 відповідно.

2. Визначаємо параметр T^* за формулою $T^* = kT / \varepsilon$.

3. За визначеним параметром T^* відповідно до даних табл. 2.1 знаходимо значення приведенного інтегралу зіткнень $\Omega^{(2,2)*}$.

4. За формулою (2.8) знаходимо коефіцієнт теплопровідності газу.

5. При розрахунку коефіцієнта теплопровідності багатоатомних газів для урахування внутрішніх обертальних та коливальних ступенів свободи розраховується поправка Ейкена за формулою (2.9).

6. Знайдене у п.4 значення коефіцієнту теплопровідності уточнюється поправкою Ейкена наступним чином:

$$\lambda = \lambda_0 \cdot K,$$

де λ_0 – знайдене значення коефіцієнта теплопровідності за формулою (2.8).

2.2.3 Довідкові дані і варіанти завдання

Довідкові дані: універсальна газова стала $R = 8,314 \text{ Дж}/(\text{моль}K)$.

Варіанти завдань надано в табл. 2.5. Слідкуйте за розмірністю величин в розрахункових формулах і в завданні.

Таблиця 2.5 - Варіанти індивідуального завдання 2.2

Номер варіанту	Газ	T, K	C_v
1	азот	500	2,6R
2	кисень	400	2,5R
3	вуглекислий газ	400	3,1R
4	водень	500	2,5R
5	метан	500	3,2R
6	аргон	500	1,5R
7	азот	1000	3R
8	кисень	800	2,7R
9	вуглекислий газ	700	3,3R
10	водень	900	2,65R
11	метан	800	3,4R
12	аргон	1000	1,5R
13	азот	1240	3,06R
14	кисень	1100	2,9R
15	вуглекислий газ	1000	3,5R
16	водень	1200	2,8R
17	метан	1100	3,6R
18	аргон	1500	1,5R
19	азот	1450	3,15R
20	кисень	1400	3,05R
21	вуглекислий газ	1300	3,65R
22	водень	1500	2,95R
23	метан	1400	3,8R
24	аргон	2000	1,5R
25	азот	1530	3,17R

РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Біляєва В. В., Бразалук Ю. В., Губін О. І. Практикум з теорії горіння. Дніпро : Ліра, 2024. 52 с.
2. Гусак О. Г., Шарапов С. О., Ратушний О. В. Гідрогазодинаміка : навчальний посібник. Суми : Сумський державний університет, 2022. 296 с.
3. Дреус А. Ю., Лисенко К. Є., Сясев В. О. Збірник задач з тепломасообміну : навчальний посібник. Дніпро, 2016. 124 с.
4. Мних А., Ковязін О., Мних І. Вплив теплового режиму спікання на структуру та пористість залізорудної шихти. *Металургія*. 2018. № 1(39). С. 22–25.
5. Трегуб В. Г. Проектування систем автоматизації : навч. посіб. Київ : Ліра-К, 2019. 344 с.
6. Смірнов О. М., Тімошенко С. М., Нарівський А. В., Семірягін С. В., Осипенко В. В., Скоробагатько Ю. П. Сталь України: відновлення та інновації. НВП Наукова думка, 2023. 267 с.
7. Смирнов В., Білецький В. Фізичні та хімічні основи виробництва : навч. посіб. Донецьк : Сх. вид. дім, 2005. 148 с.
8. Смирнов В.О., Білецький В.С., Шолда Р.О. Переробка корисних копалин : навч. посіб. Донецьк : Сх. вид. дім, 2013. 600 с.
9. Toulouevski Yu., Zinurov I. Innovation in Electric Arc Furnaces. Scientific Basis for Selection. Berlin : Springer-Verlag, 2010. 258 p.
10. Bhagat R. P. Agglomeration of Iron Ores. Taylor & Francis Group, 2019. 414 p. [Kortext | Agglomeration of Iron Ores](#)
11. González, D. F., González, J. I. V., & González, L. F. V. (2021). *Operations and Basic Processes in Ironmaking*. Springer International Publishing AG. <https://read.kortext.com/library/books/814313>
12. Oyegbile, B. A. (2016). *Optimization of Micro Processes in Fine Particle Agglomeration by Pelleting Flocculation*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781315671871>
<https://read.kortext.com/library/books/144670>



Навчально-методичне видання

Біляєва Вікторія Віталіївна

Теплові процеси при окускуванні:

методичні рекомендації
до виконання індивідуальних завдань

Самостійне електронне мережеве видання
Публікується в авторській редакції