

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**



ІНЖЕНЕРНІ РОЗРАХУНКИ НА ПЕОМ

Завдання до самостійного розв'язання

Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського як навчальний посібник для підготовки бакалаврів, які навчаються за освітніми програмами

Інжиніринг пакувань та пакувального обладнання, Інжиніринг обладнання виробництва полімерних та будівельних матеріалів і виробів

Видання 2-ге, перероблене і доповнене

Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2026

Інженерні розрахунки на ПЕОМ. Завдання самостійного розв’язання : навч. посіб. для підготовки бакалаврів денної форми навчання за освітніми програмами Інжиніринг паковань та пакувального обладнання, Інжиніринг обладнання виробництва полімерних та будівельних матеріалів і виробів / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: Д. Е. Сідоров, І. О. Казак. – Електронні текстові дані (1 файл: 1,82 Мбайт). – [2-ге вид. перероб. і доп.]. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2026. – 111 с.

Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського (протокол № 7 від 08.05.2026 р., реєстр. № 25/26-352) за поданням Вченої ради факультету автоматизації, промислової інженерії та екології (протокол № 4 від 27.04.2026 р.)

Електронне мережне навчальне видання

ІНЖЕНЕРНІ РОЗРАХУНКИ НА ПЕОМ

Завдання до самостійного розв’язання

Укладачі: *Сідоров Дмитро Едуардович.*, канд. техн. наук, доц.
Казак Ірина Олександрівна, канд. пед. наук, доц.

Відповідальний редактор *Шаблій Т.О.*, докт. техн. наук, проф.
Рецензент: *Коржик М.В.*, канд. техн. наук, доц.

Посібник призначений для поглиблення знань шляхом самостійної роботи студентів, набуття досвіду у програмуванні обчислювальних інженерних задач, їх аналізу та сприяє розвитку алгоритмічного мислення студентів.

Посібник містить завдання, згруповані по темах у кількості 40 і більше завдань, чого достатньо для організації освітнього процесу у потоці з двох академічних груп. Наприкінці посібника наведено перелік рекомендованих навчально-методичних матеріалів.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОСТІЙНОГО РОЗВ'ЯЗАННЯ.....	7
ТЕМА 1. ОПЕРАЦІЇ ВВЕДЕННЯ ТА ВИВЕДЕННЯ. ОБЧИСЛЕННЯ АРИФМЕТИЧНИХ ВИРАЗІВ.....	7
ТЕМА 2. УМОВНІ ОПЕРАТОРИ УПРАВЛІННЯ, ОПЕРАТОР БЕЗУМОВНОГО ПЕРЕХОДУ.....	27
ТЕМА 3. РОБОТА З ЕЛЕКТРОННИМИ ТАБЛИЦЯМИ. БУДУВАННЯ ДІАГРАМ.....	55
ТЕМА 4. ЦИКЛІЧНІ ОБЧИСЛЮВАЛЬНІ ПРОЦЕСИ.....	63
ТЕМА 5. РОБОТА З ІНТЕГРОВАНИМ СЕРЕДОВИЩЕМ РОЗРОБКИ ДОДАТКІВ.....	90
ТЕМА 6. СТВОРЕННЯ ПРОГРАМ З ВИКОРИСТАННЯМ ПРОГРАМНИХ ОДИНИЦЬ.....	94
ТЕМА 7. РОЗВ'ЯЗАННЯ ДИФЕРЕНЦІЙНИХ МОДЕЛЕЙ НА БАЗІ ЗВИЧАЙНИХ ДИФЕРЕНЦІЙНИХ РІВНЯНЬ.....	106
СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ ТА ЕЛЕКТРОННИХ РЕСУРСІВ.....	109

ВСТУП

Сучасний етап розвитку інформаційних технологій характеризується стрімким впровадженням методів комп'ютерного моделювання та автоматизації обчислень у всі сфери людської діяльності: від інженерії та економіки до медицини та фундаментальної науки. Навички програмування та алгоритмічного мислення перестали бути прерогативою виключно вузьких фахівців ІТ-сектору, ставши базовим інструментарієм сучасного дослідника та аналітика.

Даний навчальний матеріал розроблений з метою формування у здобувачів освіти цілісного розуміння логіки побудови обчислювальних процесів. Програма курсу охоплює шлях від елементарних операцій введення-виведення даних до вирішення складних прикладних задач — розв'язання диференціальних рівнянь, що є основою для моделювання реальних інженерних та фізичних систем.

Навчальний матеріал побудований за принципом поступового нарощування складності, де кожен наступний розділ базується на інструментарії попереднього.

Першим етапом опанування будь-якого курсу дисципліни з використанням алгоритмічної мови є вивчення операцій введення та виведення даних. Основи взаємодії та обчислень – це фундамент, без якого неможливий діалог між користувачем та програмою. Обчислення арифметичних виразів дозволяє зрозуміти пріоритетність операцій у машинному середовищі та особливості роботи з різними типами даних (цілими, дійсними числами).

Алгоритмічна логіка: розгалуження та переходи. Для реалізації складних сценаріїв програма повинна вміти приймати рішення. Розділ, присвячений умовним операторам, навчає створювати нелінійні алгоритми. Окрему увагу приділено оператору безумовного переходу, розуміння якого необхідне для аналізу структури коду, хоча сучасні стандарти й надають перевагу структурованому підходу.

Табличні обчислення та візуалізація. У сучасному світі дані часто представлені у вигляді масивів. Робота з електронними таблицями — це не лише автоматизація розрахунків, а й потужний інструмент візуалізації. Побудова діаграм дозволяє трансформувати сухі цифри у наочні графічні моделі, що є критично важливим для презентації результатів аналізу.

Автоматизація через цикли. Циклічні обчислювальні процеси є ядром програмування. Вони дозволяють виконувати тисячі однотипних операцій за долі секунди. Опанування циклів відкриває шлях до обробки великих масивів даних, багатопрохідних та ітераційних методів розв'язання задач.

Професійне середовище та модульність. Сучасна розробка неможлива без використання інтегрованих середовищ розробки (IDE), які забезпечують засоби налагодження та автодоповнення коду. Використання програмних одиниць (функцій, процедур, модулів) вчить студентів принципам процедурного програмування, розбиттю великої складної задачі на менші, зрозумілі та незалежні блоки.

Математичне моделювання та диференційні рівняння. Фінальним та найбільш інтелектуально містким етапом курсу є розв'язання диференційних моделей. Більшість процесів у природі та техніці описуються диференційними рівняннями. Навички їх чисельного розв'язання за допомогою комп'ютера дозволяють прогнозувати поведінку систем, аналізувати стійкість процесів та знаходити оптимальні рішення в умовах динамічних змін.

Головною метою цього видання є не стільки вивчення синтаксису конкретної мови програмування чи функціонала офісного додатка, а розвиток алгоритмічної культури.

Після успішного завершення курсу здобувач освіти повинен: знати основні конструкції мов програмування, методи побудови алгоритмів та способи чисельного розв'язання математичних моделей; вміти створювати програмне забезпечення для автоматизації рутинних розрахунків, працювати в сучасних середовищах розробки, візуалізувати дані та інтерпретувати результати

обчислювальних експериментів; володіти навичками самостійного пошуку помилок у коді та оптимізації обчислювальних процесів.

Даний матеріал містить розгалужену систему завдань для самостійного розв'язання, що сприяє закріпленню теоретичних знань на практиці та стимулює творчий підхід до розв'язання інженерних задач.

Для максимальної ефективності опанування матеріалу рекомендується опрацьовувати розділи послідовно. Особливу увагу слід приділяти практичній частині: кожен арифметичний вираз чи цикл має бути власноруч протестований у середовищі програмування.

Список літератури та ресурсів, наведений наприкінці, допоможе розширити знання за межі базового курсу та познайомить із сучасними тенденціями у сфері інженерних розрахунків, обчислювальної математики та програмування.

ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОСТІЙНОГО РОЗВ'ЯЗАННЯ

ТЕМА 1. ОПЕРАЦІЇ ВВЕДЕННЯ ТА ВИВЕДЕННЯ. ОБЧИСЛЕННЯ АРИФМЕТИЧНИХ ВИРАЗІВ

1.1. Визначити час, що необхідний для спорожнення бака. Діаметр бака $D = 1$ м. Бак наповнено на висоту $h = 2$ м. Отвір у днищі $d = 3$ см. Коефіцієнт витрати $\alpha = 0,61$; $g = 9,81$ м/с², $\pi = 3,1415$. Формула для обчислення:

$$\tau = \frac{2f\sqrt{h}}{\alpha f_0 \sqrt{2g}},$$

де $f = \pi \frac{D^2}{4}$ – площа перерізу ємності м²; $f_0 = \pi \frac{d^2}{4}$ – площа отвору, м².

1.2. Визначити значення критерію Рейнольдса Re в міжтрубному просторі теплообмінника типу “труба у трубі” та супутні величини, якщо труби мають натульні діаметри $d_1 = 22$ мм, $d_2 = 51$ мм, товщину стінки $\delta_1 = 2$ мм, $\delta_2 = 2,5$ мм; масова витрата рідини $\nu = 1,730$ кг/с, динамічна в'язкість $\mu = 1,2 \cdot 10^{-3}$ Па·с, густина $\rho = 1150$ кг/м³. Формули для обчислення:

$$Re = \frac{\omega d_3}{\mu} \rho; d_3 = d_2^1 - d_1; \omega = \frac{\nu}{0.785 \rho [(d_2^1)^2 - d_1^2]};$$

$$d_2^1 = d_2 - 2\delta_2.$$

1.3. Повітря масою 1 кг при початкових параметрах: тиск $P_1 = 1 \cdot 10^5$ Па, температура $T_1 = 303$ К стискується за адіабатою до $P_2 = 1 \cdot 10^6$ Па. Знайти

кінцевий об'єм повітря при $R = 292,7 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$, $K = 1,4$, використовуючи формулу:

$$V_2 = \frac{RT_1}{P_1} \left(\frac{P_1}{P_2} \right)^{1/K}.$$

1.4. Визначити об'ємні витрати повітря за нормальних умов та супутні величини, якщо воно проходить по трубах теплообмінника (зовнішній діаметр $d^1 = 20 \text{ мм}$, товщина стінки $\delta = 2 \text{ мм}$ число труб $\eta = 100$), швидкість $\omega = 9 \text{ м/с}$ при $T = 333 \text{ К}$, тиск $P_{\text{МАН}} = 2 \cdot 10^5 \text{ Па}$, барометричний тиск $P_{\text{БАР}} = 1,68 \cdot 10^5 \text{ Па}$, $\rho_0 = 1.293 \text{ кг/м}^3$, $T^0 = 273 \text{ К}$. Формули для обчислення:

$$V_0 = \frac{M}{\rho_0}; \quad M = \omega \eta 0.785 d^2 \rho;$$

$$\rho = \rho_0 \frac{PT_0}{P_0(T_0 - T)};$$

$$d = d^1 - 2\delta; \quad P = P_{\text{БАР}} + P_{\text{МАН}}.$$

1.5. Знайти діаметр трубопроводу для транспортування водню при масових витратах $V = 0,04 \text{ кг/с}$ та супутні величини. Довжина трубопроводу $L = 1000 \text{ м}$. Корисне падіння тиску $\Delta P = 1080 \text{ Па}$. Густина водню $\rho = 0,0825 \text{ кг/м}^3$; $\lambda = 0,03$. Формули для розрахунків:

$$d = c \sqrt{\frac{L W^2 \rho}{\Delta P}};$$

$$c = \sqrt[5]{\frac{\lambda}{2 \cdot 0.785^2}};$$

$$W = \frac{V}{\rho}.$$

1.6. Визначити зміщення серединної лінії труби гідроциліндра з розмірами $r_{вн} = 0,1$ м, $r_{зов} = 0,25$ м та супутні величини, якщо діє навантаження тиском $P_{вн} = 200$ МПа, $P_{зов} = 80$ МПа. Гідроциліндр зроблений з сталі з коефіцієнтом Пуассона $\mu = 0,3$; модулем пружності $E = 2 \cdot 10^5$ МПа; $n = 2$. Розрахункова формула:

$$U = \frac{1 - \mu}{E} \frac{r_{вн}^n P_{вн} - r_{зов}^n P_{зов}}{r_{зов}^n - r_{вн}^n} r_{сер} + \frac{1 + \mu}{E} \frac{r_{вн}^n r_{зов}^n (P_{зов} - P_{вн})}{(r_{зов}^n - r_{вн}^n) r_{сер}},$$

$$\text{де } r_{сер} = \frac{r_{вн} + r_{зов}}{2}.$$

1.7. Розрахувати коефіцієнт тепловіддачі α та критерій Нусельта Nu , в цементній обертовій печі при температурі $T_r = 1600$ °С, температурі футерівки $T_\phi = 1100$ °С, коефіцієнті чорноти поверхні $C_\epsilon = 1,18$. Швидкість руху потоку $\omega_r = 6$ м/с, теплопровідність $\lambda_r = 0,048$ Вт/(м·°С), кінематична в'язкість $\nu_r = 80,7 \cdot 10^{-6}$ м²/с. Діаметр печі $D_{II} = 4,6$ м, $m = 4$. Розрахункові формули:

$$\alpha = \frac{Nu \lambda_r}{D_{II}} + \frac{C_\epsilon \left[\left(\frac{T_r + 273}{100} \right)^m - \left(\frac{T_\phi + 273}{100} \right)^m \right]}{(T_r - T_\phi)};$$

$$Nu = 0.418 \left(\frac{\omega_r D_{II}}{\nu_r} \right)^{0.67}.$$

1.8. Визначити напруження P від гарячої посадки, що виникає на стику двох складених труб. Величина натягу $\delta = 12 \cdot 10^{-5}$ м, радіуси першої труби r_a дорівнює 0,1 м, радіус контакту труб $r_\epsilon = 0,3$ м, пружний радіус другої труби r_c

дорівнює 0,4 м. Труби виконані з однакової сировини з модулем пружності $E = 2 \cdot 10^5$ МПа, $k = 3$, $n = 2$. Розрахункова формула:

$$P = \frac{\delta E}{2r_B^k} \frac{(r_c^n - r_b^n)(r_b^n - r_a^n)}{r_c^n - r_a^n}.$$

1.9. Визначити критичну швидкість течії сухої водяної пари (м/с) при початковому тиску $P_1 = 1 \cdot 10^6$ Па, питомий об'єм $V_1 = 0,263$ м³/кг, показник політропи $k = 1,135$ та $g = 9,81$ м/с². Розрахункова формула:

$$W_{kp} = \sqrt{kg \frac{2}{k+1} P_1 V_1}.$$

1.10. Знайти жорсткість D та максимальний прогин $W_{\max}$ пластинки радіуса $r = 0,2$ м, товщиною $h = 0,03$ м, що жорстко закріплена по контуру та піддана дії рівномірно розподіленого навантаження $q = 0,3$ МПа при модулі пружності $E = 2 \cdot 10^5$ МПа. Коефіцієнт Пуассона $\mu = 0,3$ та $n = 4$. Розрахункова формула:

$$W_{\max} = \frac{qr^n}{64D};$$

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\mu)}.$$

1.11. Визначити максимальні витрати пари через сопло за умов: площа перетину сопла $f = 1 \cdot 10^{-5}$ м², питомий об'єм $V_1 = 0,5$ м³/кг, початковий пари тиск $P_1 = 1 \cdot 10^6$ Па, показники політропи $\kappa = 1,135$, $g = 9,81$ м/с². Розрахункова формула:

$$G_{\max} = 1,99f \sqrt{\left(kg \frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k+1}{k-1}} \frac{P_1}{V_1}}.$$

1.12. Визначити максимальні напруження в круглій жорстко закріпленій по контуру пластини радіуса $r = 0,35$ м, товщиною $h = 0,05$ м, під дією рівномірного навантаження $q = 5,8$ МПа. Коефіцієнт Пуассона $\mu = 0,3$; $n = 2$. Розрахункові формули:

$$(\sigma_r)_{\max} = -\frac{3}{4} \frac{qd^n}{h^n};$$

$$(\sigma_\tau)_{\max} = -\frac{3}{4} \mu \frac{qd^n}{h^n}; d=2r.$$

1.13. Визначити максимальні витрати газу через сопло що звужується, якщо початкові параметри газу $P_0 = 6,4 \cdot 10^6$ Па, $V_0 = 0,0139$ м³/м, $k = 1,4$. Площа отвору сопла $f = 5 \cdot 10^{-5}$ м². Розрахункова формула:

$$G = f \sqrt{2 \frac{k}{k+1} \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{2}{k-1}} \frac{P_0}{V_0}}.$$

1.14. Визначити переміщення U зовнішньої поверхні диска зовнішнього радіусу $b = 0,15$ м і внутрішнього радіусу $a = 0,05$ м, що виникають під дією відцентрових сил. Швидкість обертання диску $\omega = 157$ рад/с, $E = 2 \cdot 10^5$ МПа, $g = 9,81$ м/с², $\gamma = 7,65 \cdot 10^4$ Н/м³, $n = 2$, $\mu = 0,3$. Розрахункові формули:

$$N = (1 - \mu^n) \frac{\gamma \omega^n}{gE};$$

$$U = \frac{Nb}{8} \left[\frac{3 + \mu}{1 + \mu} (a^n + b^n) + \frac{31\mu}{1 - \mu} (a^n - b^n) \right].$$

1.15. Знайти коефіцієнт теплопередачі k і витрати теплоти q з одного метра квадратного поверхні стінки з вогнетривкої (товщина $\delta_1 = 0,5$ м,

теплопровідність $\lambda_1 = 1,16 \text{ Вт/(м К)}$) та будівельної цегли ($\delta_2 = 0,25 \text{ м}$, $\lambda_2 = 0,5 \text{ Вт/(мК)}$). Температура та коефіцієнт тепловіддачі в печі, відповідно, $t_r = 1500 \text{ С}$, $\alpha_1 = 34,8 \text{ Вт/(м}^2\text{К)}$, зовні $t_0 = 25 \text{ С}$, $\alpha_2 = 16,2 \text{ Вт/(м}^2\text{К)}$. Розрахункові формули:

$$q = k(t_r - t_0);$$

$$k = \frac{1}{\left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{1}{\alpha_2} \right)}.$$

1.16. Визначити коефіцієнт теплопередачі і температуру на межі між вогнетривкою та будівельною цеглою, за умовами задачі 15. Розрахункові формули:

$$T_k = T_r - k(T_r - T_0)\left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\lambda_1}\right);$$

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{1}{\alpha_2}}.$$

1.17. Визначити максимальні напруження у круглій, закріпленій по контуру пластині діаметром $D = 0,8 \text{ м}$ і товщиною $\delta = 0,05 \text{ м}$, яка знаходиться під дією рівномірно розподіленого навантаження $q = 4,12 \text{ МПа}$. Коефіцієнт Пуассона матеріалу пластини $\mu = 0,3$, показник $n = 2$. Формули для розрахунків:

$$\sigma_r^{\max} = -\frac{3}{4} \frac{qD^n}{\delta^n},$$

$$\sigma_\tau^{\max} = -\frac{3}{4} \mu \frac{qD^n}{\delta^n}.$$

1.18. Визначити площу перетину S отвору та максимальну витрату G продуктів горіння, що витікають через конфузorne сопло, якщо початкові параметри продуктів горіння такі: $P_0 = 4,2 \cdot 10^6$ МПа; $V_0 = 1,2 \cdot 10^{-2}$ м³/кг; $k = 1,4$; діаметр сопла $d = 1,2 \cdot 10^{-2}$ м. Формули для розрахунків:

$$G = S \sqrt{2 \frac{k}{k+1} \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{2}{k-1}} \left(\frac{P_0}{V_0} \right)^{\frac{1}{2}}},$$

$$S = \frac{\pi d^2}{4}.$$

1.19. Визначити критичну швидкість течії сухої водяної пари при початковому тиску $P_n = 1,3 \cdot 10^6$ Па, питомому об'ємі $V_{num} = 0,32$ м³/кг, показнику політропи $k = 1,135$ і $g = 9,81$ м/с² за формулою:

$$V_{кр.} = \left(kg \frac{2}{k+1} P_n V_{num} \right)^{\frac{1}{2}}.$$

1.20. Визначити прогин U (та супутні величини) круглої пластини діаметром $D = 0,5$ м і товщиною $\delta = 2,8 \cdot 10^{-2}$ м при жорсткому закріпленні контуру і діючому тиску $P = 0,28$ МПа. Модуль пружності $E = 2,1 \cdot 10^5$ МПа. Коефіцієнт Пуассона $\mu = 0,3$; $n = 4$. Формули для розрахунку:

$$U = \frac{P \cdot r^n}{64\gamma},$$

$$\gamma = \frac{E \cdot \delta^3}{12(1-\mu)},$$

$$r = \frac{D}{2}.$$

1.21. Визначити площу перетину сопла S та витрати пари G , що витікає з сопла діаметром $D = 1,1 \cdot 10^{-2}$ м парової камери. Відносний об'єм парової камери $V = 0,48$ м³/кг, тиск $P = 1,3 \cdot 10^6$ Па, показник політропи $k = 1,112$, $g = 9,81$ м/с².
Формули для розрахунку:

$$G = 1,99 \cdot S \left(kg \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{2(k-1)}} \sqrt{\frac{P}{V}},$$

$$S = \frac{\pi D^2}{4}.$$

1.22. Диск, який швидко обертається, має внутрішній радіус $r_1 = 0,052$ м і зовнішній радіус $r_2 = 0,136$ м. Диск знаходиться під дією відцентрових сил. Визначити величину діючої сили N та переміщення U зовнішньої поверхні диска, якщо швидкість обертання $\omega = 138$ рад/с; $E = 2,1 \cdot 10^5$ МПа; $g = 9,8$ м/с; $\gamma = 7,7 \cdot 10^4$ Н/м³; $n = 2$; $\mu = 0,3$. Формули для розрахунку:

$$U = \frac{Nr_2}{8} \left[\frac{3+\mu}{1+\mu} (r_1^h + r_2^h) + \frac{3+\mu}{1-\mu} (r_1^h - r_2^h) \right],$$

$$N = (1 - \mu^h) \frac{\gamma \omega^h}{gE}.$$

1.23. Визначити витрати теплоти Q (Вт) шляхом випромінювання (та супутні величини) квадратним цегляним каналом зі стороною $d = 0,5$ м, довжиною каналу $\ell = 15$ м, з температурою внутрішньої поверхні стінки $t_1 = 250$ °С і зовнішньої $t_2 = 30$ °С, якщо $\pi = 3,14$ та $C_0 = 5,67$ Вт/(м² К⁴). Ступінь чорноти цегли $E_1 = 0,93$. Формули для обчислення:

$$Q = E_1 C_0 F \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right],$$

$$F = \pi \cdot d \cdot \ell,$$

$$T_1 = t_1 + 273, \quad T_2 = t_2 + 273.$$

1.24. З циліндричної ємності діаметром $D = 2$ м розчин соляної кислоти подається в редуктор. Визначити площі S , s та час τ , при якому уся рідина із ємності, що наповнена до висоти $H = 2,7$ встигає потрапити в редуктор. Мінімальний діаметр прохідного перерізу отвору $d = 25$ мм. Коефіцієнт витрати $\alpha = 0,68$; $g = 9,81 \text{ м/с}^2$. Користуватися формулами:

$$\tau = \frac{2S\sqrt{H}}{\alpha s\sqrt{2g}},$$

$$S = \pi \frac{D^2}{4},$$

$$s = \pi \frac{d^2}{4}.$$

1.25. Розчин тече у теплообмінному каналі кільцевого перерізу. Діаметр каналу: $D = 70$ мм, $d = 26$ мм. Визначити значення критерію Рейнольдса Re в каналі та супутні величини, якщо масова витрата розчину $G = 1,85$ кг/с; його густина $\rho = 1160$ кг/м³; динамічна в'язкість $\mu = 1,28 \cdot 10^{-3}$ Па·с. Формули для розрахунку:

$$Re = \frac{VD_{екв} \rho}{\mu},$$

$$D_{екв.} = D - d,$$

$$V = \frac{G}{0,785(D^2 - d^2)\rho}.$$

1.26. Визначити значення критерію Нусельта Nu і коефіцієнту тепловіддачі α для печі обпалювання клінкера діаметром $D = 4,2$ м, при температурі газу в печі $t_{газу} = 1500$ °С. Температура в середині печі $t_{ног} = 1120$ °С. Швидкість руху газу V

$= 8$ м/с, теплопровідність газу $\lambda = 0,045$ Вт/(м·К), кінематична в'язкість газу $\nu = 81,1 \cdot 10^{-6}$ м²/с. Формули для розрахунку:

$$\alpha = \frac{Nu\lambda}{D} + \frac{c \left[\left(\frac{t_{газ} + 273}{100} \right)^m - \left(\frac{t_{ног} + 273}{100} \right)^m \right]}{(t_{газ} - t_{ног})},$$

$$Nu = 0,418 \left(\frac{VD}{\nu} \right)^k.$$

Безрозмірні величини: $m = 4$; $k = 0,67$; $c = 1,17$.

1.27. Визначити напруження σ , які виникають від посадки з натягом у двошарової трубі, якщо натяг складає $\delta = 12,82 \cdot 10^{-5}$ м, а діаметри шарів, відповідно, $D_1 = 0,2$ м; $D_2 = 0,6$ м; $D_3 = 0,8$ м. Труби виготовлені з матеріалу що має наступні характеристики: $E = 2,1 \cdot 10^5$ МПа, $k = 3$, $n = 2$. Формули для розрахунку:

$$\sigma = \frac{\delta E}{2r_1^k} \frac{(r_3^n - r_2^n)(r_2^n - r_1^n)}{r_3^n - r_1^n},$$

$$r_1 = \frac{D_1}{2}, \quad r_2 = \frac{D_2}{2}, \quad r_3 = \frac{D_3}{2}.$$

1.28. Визначити величину питомого теплового потоку q через стінку печі обігріву, що виконана з вогнестійкої цегли товщиною $\delta_1 = 0,3$ м і теплопровідністю $\lambda_1 = 1,12$ Вт/(м·К). Піч укріплена будівельною цеглою товщиною $\delta_2 = 0,125$ м і теплопровідністю $\lambda_2 = 0,59$ Вт/(м·К). Температура і коефіцієнт тепловіддачі всередині $t_b = 1490$ °С, $\alpha_b = 33,92$ Вт/(м²·К), ззовні – $t_c = 28$ °С, $\alpha_c = 14,3$ Вт/(м²·К). Формули для розрахунку:

$$q = K(T_b - T_c),$$

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_B} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{1}{\alpha_c}}.$$

1.29. Визначити максимальне зусилля у круглій, закріпленій по контуру пластині що має діаметр $D = 0,8$ м і товщину $\delta = 0,05$ м, яка знаходиться під дією рівномірно розподіленого навантаження $q = 4,12$ МПа. Коефіцієнт Пуассона $\mu = 0,3$; $n = 2$. Формули для розрахунку:

$$\sigma_r^{\max} = -\frac{3}{4} \frac{qD^n}{\delta^n},$$

$$\sigma_\tau^{\max} = -\frac{3}{4} \mu \frac{qD^n}{\delta^n}.$$

1.30. Визначити максимальну витрату G продуктів горіння, що витікають крізь конфузorne сопло, якщо початкові параметри продуктів горіння такі: $P_0 = 7,2 \cdot 10^6$ МПа; $V_0 = 1,42 \cdot 10^{-2}$ м³/кг; $\kappa = 1,39$; діаметр сопла $d = 2 \cdot 10^{-2}$ м. Формули для розрахунку:

$$G = S \sqrt{2 \frac{k}{k+1} \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{2}{k-1}} \left(\frac{P_0}{V_0} \right)^{\frac{1}{2}}},$$

$$S = \frac{\pi d^2}{4}.$$

1.31. Визначити критичну швидкість течії сухої водяної пари при початковому тиску $P_n = 1,113 \cdot 10^6$ Па, питомому об'ємі $V_{num} = 0,2$ м³/кг показнику політропи $k = 1,129$ і $g = 9,81$ м/с² за формулою:

$$V_{кр.} = \left(kg \frac{2}{k+1} P_n V_{num} \right)^{\frac{1}{2}}.$$

1.32. Визначити прогин U (і супутні величини) круглої пластини діаметром $D = 0,5\text{ м}$ і товщиною $\delta = 2,8 \cdot 10^{-2}\text{ м}$ при жорсткому закріпленні контуру і діючому тиску $P = 0,28\text{ МПа}$. Модуль пружності $E = 2,1 \cdot 10^5\text{ МПа}$. Коефіцієнт Пуассона $\mu = 0,3$; $n = 4$. Формули:

$$U = \frac{P \cdot r^n}{64\gamma},$$

$$\gamma = \frac{E\delta^3}{12(1-\mu)},$$

$$r = \frac{D}{2}.$$

1.33. Визначити витрати пари G що витікає з соплу діаметром $D = 1,1 \cdot 10^{-2}\text{ м}$ парової камери, відносним об'ємом $V = 0,48\text{ м}^3/\text{кг}$. Тиск $P = 1,3 \cdot 10^6\text{ Па}$, показник політропи $k = 1,112$, $g = 9,81\text{ м/с}^2$. Формула для розрахунку:

$$G = 1,99 \frac{\pi D^2}{4} \left(kg \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{2(k-1)}} \sqrt{\frac{P}{V}}.$$

1.34. Визначити витрати теплоти Q (Вт/м^2) шляхом випромінювання залізною трубою діаметром $d = 0,1\text{ м}$, довжиною $\ell = 10\text{ м}$, якщо внутрішня температура поверхні стінки $t_1 = 275\text{ }^\circ\text{C}$ і зовнішня $t_2 = 25\text{ }^\circ\text{C}$, а також відомі сталі $\pi = 3,14$ та $C_0 = 5,67\text{ Вт/(\text{м}^2\text{ К}^4)}$, ступінь чорноти заліза $E = 0,35$. Формули для обчислення:

$$Q = q \cdot F, \quad F = \pi \cdot d \cdot \ell,$$

$$T_1 = t_1 + 273, \quad T_2 = t_2 + 273,$$

$$q = EC_0 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right].$$

1.35. Стінка топочної камери парового котла виготовлена із шару піношамоту товщиною $\delta_1 = 1,5 \cdot 10^{-2}$ м та шару червоної цегли товщиною $\delta_2 = 4,5 \cdot 10^{-2}$ м. Температура внутрішньої поверхні камери $t_1 = 1000$ °С і зовнішньої $t_2 = 50$ °С. Коефіцієнт теплопровідності цегли $\lambda_2 = 0,28$ Вт/(м·К). Знайти питомі витрати теплоти топочної камери q , Вт/м². Формули для обчислення:

$$q = \frac{t_1 - t_2}{R_1 + R_2},$$

$$R_1 = \frac{\delta_1}{\lambda_1}, \quad R_2 = \frac{\delta_2}{\lambda_2},$$

$$\lambda_1 = 0,28 + 0,0023 \frac{t_1 + t_2}{2}.$$

1.36. Визначити питомий тепловий потік q , Вт/м², через циліндричну залізну одношарову стінку, якщо внутрішній і зовнішній діаметри стінки, відповідно, $d_1 = 20$ мм і $d_2 = 24$ мм, коефіцієнт теплопровідності заліза складає $\lambda = 30$ Вт/(м·К), температура на внутрішній і зовнішній поверхні стінки, відповідно, $t_1 = 180$ °С і $t_2 = 27$ °С; $\pi = 3,14$. Формули для обчислення:

$$q = \frac{t_1 - t_2}{R},$$

$$R = \frac{1}{2\pi\lambda} \cdot \ln \frac{d_2}{d_1}.$$

1.37. Визначити інтенсивність тепловіддачі α (Вт/(м²·К)) при кипінні рідини в котлі, якщо коефіцієнт теплопровідності $\lambda = 0,8$ Вт/(м·К), визначальний розмір $d_0 = 0,04$ м, критерій теплового навантаження $K = 5,1$, критерій Прандтля $Pr = 1,1$. Формули для обчислення:

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{d_0};$$

$$Nu = 54 \cdot K^{0,6} \cdot Pr^{-0,3}.$$

1.38. Визначити дійсну швидкість течії кисню $C_{2д} = \varphi \cdot C_2$ (м/с) з сопла, якщо тиск і температура на вході у сопло $P_0 = 12 \cdot 10^5$ Па і $t_0 = 227$ °С. Тиск на виході з сопла дорівнює атмосферному тиску $P_2 = 0,95 \cdot 10^5$ Па. Показник швидкості потоку $\varphi = 0,95$. Показник адіабати повітря $k = 1,4$. Розрахункові формули:

$$C_2 = \sqrt{2 \frac{k}{k-1} R T_0 \left(1 - \left(\frac{P_2}{P_0} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right)};$$

$$T = t_0 + 273, \quad K;$$

Універсальна газова стала кисню $R = 259,8$ Дж/(кг·К).

1.39. Маса газу азоту $m = 5$ кг політропічне розширюється від $P_1 = 8 \cdot 10^3$ Па і $v_1 = 0,127$ м³ до $P_2 = 0,9 \cdot 10^3$ Па і $v_2 = 0,8$ м³. Визначити теплоємність політропного процесу C_n , кДж/(кг·К) і роботу L , кДж, якщо показник політропи $n = 1,15$, а показник адіабати повітря $K = 1,4$.

Формули для розрахунку:

$$C_n = C_v \frac{n-K}{n-1};$$

$$L = m \cdot \left(\frac{P_1 v_1 - P_2 v_2}{n-1} \right).$$

Ізохорна теплоємність азоту $C_v = 0,746$ кДж/(кг·К).

1.40. По трубопроводу протікає кисень з об'ємною витратою $V_\tau = 10$ м³/с при температурі $t = 127$ °С ($T = t + 273$ К) і тиску $P = 0,4 \cdot 10^6$ Па. Визначити масову

витрату кисню m_τ , кг/с, і діаметр трубопроводу d , м, якщо швидкість течії газу в трубопроводі $\omega = 15$ м/с. Молярна маса кисню $\mu = 32$ кг/кмоль, універсальна газова стала кисню $R = 259,8$ Дж/(кг·К), $\pi = 3,14$. Формула для розрахунку:

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot V_\tau}{\pi \cdot \omega}};$$

$$m_\tau = \frac{P \cdot V_\tau}{R \cdot T}.$$

1.41. Визначити густину ρ , кг/м³, газу при абсолютному тиску $P = 0,1 \cdot 10^6$ Па і температурі $t = 15$ °С ($T = t + 273$ К). Універсальна газова стала ідеального газу $R_\mu = 8314$ Дж/(кг·К), $\mu = 1,2$. Формули для розрахунку:

$$R_{co} = \frac{R_\mu}{\mu},$$

$$\rho = \frac{P}{R_{co} \cdot T}.$$

1.42. У закритому посуді з об'ємом $v_1 = 0,8$ м³ знаходиться оксид вуглецю СО під тиском $P_1 = 2,2 \cdot 10^6$ Па і температурі $t_1 = 20$ °С. До газу підводиться кількість теплоти $Q_v = 4600$ кДж. Визначити температуру t_2 , °С, і тиск P_2 , МПа, оксиду вуглецю у кінці процесу, якщо теплоємність газу $C_v = 0,742$ кДж/(кг·К), універсальна газова стала оксиду вуглецю $R = 296,9$ Дж/(кг·К). Формули для розрахунку:

$$t_2 = \frac{Q_v}{m \cdot C_v} + t_1,$$

$$m = \frac{P_1 \cdot v_1}{R \cdot T_1},$$

$$P_2 = P_1 \frac{T_2}{T_1},$$

$$T_1 = t_1 + 273,$$

$$T_2 = t_2 + 273.$$

1.43. Швидкість кисню в апараті $v_1 = 3$ м/с, тиск $P_1 = 1,2 \cdot 10^6$ Па і температура $t_1 = 20$ °С. Визначити масу кисню m , кг, та кількість теплоти Q_v , кДж, яка підводиться до кисню, якщо температура у кінці процесу підвода теплоти складає $t_2 = 320$ °С, теплоємність газу $C_v = 0,746$ кДж/(кг·К), а універсальна газова стала $R = 259,8$ Дж/(кг·К). Формули для розрахунку:

$$m = \frac{P_1 \cdot v_1}{R \cdot T_1};$$

$$Q_v = m \cdot C_v \cdot (t_2 - t_1);$$

$$T_1 = t_1 + 273, \text{ К.}$$

1.44. Відливка з хрому $T_1 = 20$ °С нагрівається в муфельній електричній печі з температурою стінок з цегли $T_2 = 1200$ °С. Середня за період нагрівання ступінь чорноти відливки $E_1 = 0,26$, а стінки – $E_2 = 0,9$. Визначити питомий тепловий потік теплоти випромінювання в залежності від температури відливки в процесі нагрівання q , кДж/кг, якщо $C_0 = 5,67$ Вт/(м²·К), площа поверхні відливки $F_1 = 24$ м², площа поверхні стінок печі $F_2 = 120$ м². Формули для розрахунку:

$$q = E_{\text{св}} C_0 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right],$$

$$E_{\text{св}} = \frac{1}{\frac{1}{E_1} + \frac{F_1}{F_2} \cdot \left(\frac{1}{E_2} - 1 \right)}.$$

1.45. Визначити довжину трубок L , м, з яких складається 8-ми рядний калорифер ($N_1 = 8$), якщо кількість труб у одному ряді $N_2 = 5$, зовнішній діаметр трубок $d = 4,2 \cdot 10^{-2}$ м, температура зовнішньої поверхні труб $t_{cm} = 138$ °С,

визначальна температура повітря $t_0 = 40$ °С, потужність теплового потоку калорифера $Q = 112 \cdot 10^3$ Вт, $\pi = 3,14$, коефіцієнт тепловіддачі першого ряду труб $a_1 = 50$ Вт/(м²К), другого ряду – $a_2 = 75$ Вт/(м²К), третього ряду труб – $a_3 = 85$ Вт/(м²К). Формули для обчислення:

$$L = \frac{Q}{\pi \cdot d \cdot \alpha_{cep} \cdot (t_{cm} - t_0) \cdot N_1 \cdot N_2},$$

$$\alpha_{cep} = \frac{\alpha_1 + \alpha_2 + (N_1 - 2)\alpha_3}{N_1}$$

1.46. Розрахувати критерій Нусельта Nu_p для трансформаторного масла у квадратному каналі площею $f = 3,35 \cdot 10^{-5}$ м² і змоченим периметром каналу $\Pi = 2,32 \cdot 10^{-2}$ м, якщо швидкість масла $v = 0,8$ м/с, кінематична в'язкість масла $\nu = 14,5 \cdot 10^{-6}$ м²/с, критерій Грасгофа $Gr = 335$, критерій Прандтля для рідини (масло) $Pr_p = 202$, критерій Прандтля стінки $Pr_{cm} = 0,69$. Формули для розрахунку:

$$Nu_p = 0,17 \cdot Re_p^{0,33} \cdot Gr^{0,1} \cdot Pr_p^{0,43} \left(\frac{Pr_p}{Pr_{cm}} \right)^{0,25};$$

$$Re_p = \frac{v \cdot d_{екв}}{\nu};$$

$$d_{екв} = \frac{4 \cdot f}{\Pi}.$$

1.47. Визначити коефіцієнт тепловіддачі до повітря α , Вт/(м²К) та потужність теплового потоку Q , Вт, секції горизонтально розташованої батареї опалення діаметром $d = 6 \cdot 10^{-2}$ м та довжиною $H = 0,6$ м, якщо температура стінки $t_{cm} = 115$ °С, а температура повітря $t_{cep} = 25$ °С, стала $\pi = 3,14$, коефіцієнт теплопровідності повітря $\lambda = 3 \cdot 10^{-2}$ Вт/(м·К), критерій Нусельта $Nu = 35$. Формули для розрахунку:

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{d},$$

$$Q = \alpha \cdot (t_{cm} - t_{cep}) \cdot \pi \cdot d \cdot H.$$

1.48. Визначити коефіцієнт теплопровідності рідини λ_p , Вт/(м·К), якщо потужність теплового потоку через шар рідини $Q = 16$ Вт, температура платинової нитки $t_1 = 110$ °С та температура зовнішньої поверхні кварцової трубки $t_2 = 32$ °С. Стала $\pi = 3,14$, внутрішній і зовнішній діаметри $d_2 = 1 \cdot 10^{-3}$ м і $d_3 = 3 \cdot 10^{-3}$ м, діаметр $d_1 = 1,2 \cdot 10^{-2}$ м, довжина платинової нитки $L = 7,2 \cdot 10^{-2}$ м, коефіцієнт теплопровідності кварцу $\lambda_2 = 3 \cdot 10^{-2}$ Вт/(м·К). Формули для розрахунку:

$$\lambda_p = \frac{q_\ell \cdot \ln \frac{d_2}{d_1}}{\left(t_1 - t_2 - q_\ell \cdot \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_2} \cdot \ln \frac{d_3}{d_2} \right) \cdot 2 \cdot \pi},$$

$$q_\ell = \frac{Q}{\ell}.$$

1.49. Визначити втрати теплоти Q , Вт, крізь двошарову кульову стінку, виготовлену з латуні та вкриту шаром ізоляції з скловати. Внутрішній діаметр шару з латуні $d_1 = 2$ м, товщина якого $\sigma_1 = 1,7 \cdot 10^{-2}$ м, а товщина ізоляції складає $\sigma_2 = 0,15$ м. Температура внутрішньої поверхні стінки $t_1 = 165$ °С, а зовнішньої – $t_2 = 40$ °С, коефіцієнт теплопровідності латуні та коефіцієнт теплопровідності скловати $\lambda_1 = 100$ Вт/(м·К) і $\lambda_2 = 5,1 \cdot 10^{-2}$ Вт/(м·К). Стала $\pi = 3,14$. Формули для розрахунку:

$$Q = \frac{2 \cdot \pi \cdot (t_1 - t_2)}{\frac{1}{\lambda_1} \cdot \left(\frac{1}{d_1} - \frac{1}{d_2} \right) + \frac{1}{\lambda_2} \cdot \left(\frac{1}{d_2} - \frac{1}{d_3} \right)},$$

$$d_2 = d_1 + 2 \cdot \sigma_1,$$

$$d_3 = d_2 + 2 \cdot \sigma_2.$$

1.50. Визначити коефіцієнт тепловіддачі до повітря α , Вт/(м²·К), та потужність теплового потоку Q , Вт, секції вертикально розташованої батареї опалення діаметром $d = 5 \cdot 10^{-2}$ м та довжиною $H = 0,8$ м, якщо температура стінки $t_{cm} = 110$ °С, а температура повітря $t_{cep} = 20$ °С, стала $\pi = 3,14$, коефіцієнт теплопровідності повітря $\lambda = 3 \cdot 10^{-2}$ Вт/(м·К), критерій Нусельта $Nu = 45$. Формули для розрахунку:

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{H},$$

$$Q = \alpha \cdot (t_{cm} - t_{cep}) \cdot \pi \cdot d \cdot H.$$

1.51. Визначити температуру T_2 (у градусах кельвіна) повітря на виході з компресору, і на виході з газової турбіни T_4 , для газотурбінної установки, якщо відомі параметри повітря на вході у компресор: тиск $P_1 = 1 \cdot 10^5$ Па і температура $t_1 = 20$ °С, температура газів на вході в газову турбіну $t_3 = 800$ °С, ступінь стискання повітря у компресорі $s = 8$, а показник адіабати повітря $K = 1,4$. Формули для розрахунку:

$$T_2 = T_1 \cdot \pi^{\frac{K-1}{K}};$$

$$T_4 = T_3 \cdot \frac{T_1}{T_2};$$

$$T_1 = t_1 + 273; \quad T_3 = t_3 + 273.$$

1.52. Визначити термічний ККД η газотурбінної установки, якщо відомі такі параметри: температура повітря на вході у компресор $t_1 = 15$ °С, дійсна температура повітря за компресором $t_5 = 178$ °С, температура газів на вході в газову турбіну $t_{33} = 780$ °С. Формули для розрахунку:

$$\eta = \frac{(T_3 - t_6) - (t_5 - t_1)}{(t_{33} - t_6)}; \quad t_6 = T_6 - 273; \quad T_3 = t_{33} + 273;$$

$$T_1 = t_1 + 273; \quad T_6 = \frac{T_3 - T_1}{T_5}.$$

1.53. 1 кг азоту у початковому стані має тиск $P_1 = 2,44 \cdot 10^6$ Па і температуру $t_1 = 710$ °С. Після політропного розширення його тиск дорівнює $P_2 = 1,1 \cdot 10^5$ Па. Визначити роботу розширення газу ℓ , кДж/кг, якщо показник політропи n дорівнює 1,175, газова стала азоту $R = 0,297$ кДж/(кг·К). Формули для розрахунку:

$$\ell = \frac{R}{n-1} \cdot (T_1 - T_2);$$

$$T_2 = T_1 \cdot \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{n}};$$

$$T_1 = t_1 + 273, \text{ К}$$

1.54. Визначити теоретичну і дійсну температури повітря на виході з компресору t_2 , °С і T_5 , К, газотурбінної установки, якщо відомі такі параметри: $P_1 = 1,12 \cdot 10^5$ Па, $t_1 = 21$ °С, $P_2 = 4,4 \cdot 10^5$ Па, внутрішній відносний ККД компресору $\eta_{0s} = 0,84$, показник адіабати повітря $K = 1,4$. Формули для розрахунку:

$$T_5 = T_1 \cdot \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{K-1}{K}},$$

$$t_2 = \frac{t_5 - t_1}{\eta_{0s}} + t_1.$$

1.55. У холодильній машині до компресору потрапляє повітря з температурою $t_1 = -8$ °С і тиском $P_1 = 0,95 \cdot 10^5$ Па. Повітря стискається до тиску

$P_2 = 4 \cdot 10^5$ Па. Визначити температуру повітря T_2 , К, після стискання у компресорі та холодильний коефіцієнт ε . Показник адіабаты повітря $K = 1,4$. Формули для розрахунку:

$$T_2 = T_1 \cdot \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{K-1}{K}};$$

$$T_1 = t_1 + 273;$$

$$\varepsilon = \frac{T_1}{T_2 - T_1}.$$

1.56. Розрахувати еквівалентно-ефективну температуру t_e за формулою Міссендара:

$$t_e = 37 - 0,29t \left(1 - \frac{f}{100} \right) - \frac{37 - t}{0,68 - 0,0014f + \frac{1}{1,76 + 1,4v^{3/4}}}.$$

Вихідні дані: швидкість вітру $v = 2,1$ м/с; прийняти відносну вологість повітря $f = 72$ %; температуру повітря $t = 21$ °С.

ТЕМА 2. УМОВНІ ОПЕРАТОРИ УПРАВЛІННЯ, ОПЕРАТОР БЕЗУМОВНОГО ПЕРЕХОДУ

2.1. Відомі фізичні константи рідини, яка протікає по трубопроводу:

$\lambda = 0,103$ Вт/(м·К); $Cp = 2,04 \cdot 10^3$ Дж/(кг·К); $\mu_c = 0,198 \cdot 10^3$ Па·с;

$\mu_{жс} = 29,7$ Па·с; $Re = 1500$; геометричні розміри: $l = 1,1$ м; $d = 0,072$ м.

Визначити коефіцієнт опору тертю ε при в'язкій течії рідини за формулами:

$$n = C \left(Pe \frac{l}{d} \right)^m \left(\frac{\mu_c}{\mu_{жс}} \right)^{-0,9};$$

$$\varepsilon = \varepsilon_K \left(\frac{\mu_c}{\mu_{жс}} \right)^n; \quad \varepsilon_K = \frac{64}{Re}; \quad \pi = 3,1415;$$

$$Pe \frac{l}{d} = \frac{4G}{\pi d} \frac{Cp}{\lambda};$$

$$\begin{cases} C = 2,31; m = -0,3, & \text{якщо } Pe \frac{l}{d} \leq 1500; \\ C = 0,535; m = -0,1, & \text{якщо } Pe \frac{l}{d} > 1500. \end{cases}$$

Прийняти: $G = 2,3 \cdot 10^{-5}$.

2.2. Мідний дріт діаметром $d = 0,02$ м підвішений в потоці повітря, швидкість якого v . Фізичні властивості повітря: $\nu_T = 15,06 \cdot 10^{-6} \frac{m^2}{c}$;

теплопровідність $\lambda_T = 2,6 \times 10^{-2} \frac{Вт}{м \cdot K}$. Прийняти $\nu = 1,2 \frac{м}{с}$. Визначити коефіцієнт

тепловіддачі α поверхні проводу до повітря та супутні величини за формулами:

$$\alpha = Nu_T \frac{\lambda_T}{d}; \quad Re = \frac{v d}{\nu_T};$$

$$Nu_T = \begin{cases} 0,44 Re^{0,5}, & 10 \leq Re \leq 1 \times 10^3; \\ 0,22 Re^{0,6}, & 1 \times 10^3 < Re \leq 2 \times 10^5. \end{cases}$$

2.3. Трубка діаметром $d = 12$ мм, охолоджується водою, параметри якої наступні: $\nu = 1,3 \cdot 10^{-6} \frac{м^2}{с}$; $\lambda = 0,572 \frac{Вт}{м \cdot K}$; $Pr = 9,4$; $Pr_c = 3,6$. Визначити коефіцієнт тепловіддачі α поверхні трубки та супутні величини за формулами:

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

$$Re = \frac{Ud}{\lambda};$$

$$Nu = \begin{cases} 0,5 Re^{0,5} Pr^{0,38} \left(\frac{Pr}{Pr_c} \right)^{0,25}, & 8 \leq Re \leq 1 \times 10^3; \\ 0,25 Re^{0,6} Pr^{0,38} \left(\frac{Pr}{Pr_c} \right)^{0,25}, & 1 \times 10^3 < Re \leq 2 \times 10^5. \end{cases}$$

Прийняти швидкість потоку води $U = 0,85$ м/с.

2.4. Визначити величину теплового потоку q від калорифера діаметром $d = 0,012$ м до повітря, якщо калорифер має температуру $t_c = 70$ °С. Повітря має середню температуру $t_n = 22$ °С, рухається зі швидкістю $V = 2,2$ $\frac{\text{м}}{\text{с}}$ та характеризується наступними теплофізичними величинами:

$$\nu_m = 15,061 \cdot 10^{-6} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}, \lambda_m = 2,6 \cdot 10^{-2} \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}.$$

Використані формули:

$$q = \alpha(t_c - t_m)\pi d;$$

$$\alpha = Nu_m \frac{\lambda_m}{d} \varepsilon;$$

$$Nu_m = 0,22 Re^{0,6};$$

$$Re = \frac{Vd}{\nu_m}.$$

$$\text{Прийняти } \varepsilon = \begin{cases} 1, & \varphi = 90^\circ; \\ 0,93, & \varphi = 60^\circ; \\ 0,66, & 60^\circ > \varphi \geq 30^\circ. \end{cases}$$

Передбачити, що кут атаки φ потоку повітря обирає користувач.

2.5. Визначити температуру T на глибині L стінки сушильної камери виготовленої з червоної цегли товщиною $\delta_1 = 0,25$ м, теплопровідністю $\lambda_1 = 0,7 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{с}}$, що покрита ззовні термопокриттям товщиною δ_2 (значення вивести на друк), теплопровідність $\lambda_2 = 0,047 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$. Питомі втрати теплоти крізь стінку складають $q = 112 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$. Температура стінок камери: внутрішньої – $T_B = 100$ °С, зовнішньої – $T_3 = 25$ °С. Формули:

$$\delta_2 = \lambda_2 \frac{T_B - T_3}{q};$$

$$T_C = T_3 + q \frac{\delta_2}{\lambda_2};$$

$$T = \begin{cases} T_B - \frac{T_B - T_C}{\delta_1} L, & 0 \leq L \leq \delta_1; \\ T_C - \frac{T_C - T_3}{\delta_2} L, & \delta_1 < L \leq \delta_2 + \delta_1. \end{cases}$$

Прийняти: $L = 0,21$ м.

2.6. Визначити величину питомого теплового потоку Φ з поверхні циліндричної секції батареї в оточуюче середовище, якщо фізичні коефіцієнти:

$$\nu_m = 16,1 \cdot 10^{-6} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}; \lambda_m = 2,66 \cdot 10^{-2} \frac{\text{Вт}}{\text{мК}}; \beta = \frac{1}{273 + t_m}; Pr = 0,7; g = 9,81 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}.$$

Формули:

$$\Phi = \alpha(t_c - t_m) \pi d;$$

$$Nu = C(GrPr)^n;$$

$$\alpha = Nu \frac{\lambda_m}{d};$$

$$GrPr = \frac{gd^3\beta(t_c - t_m)}{\nu_m^2} Pr ;$$

$$\begin{cases} C = 0,75, n = 0,25, & 1 \cdot 10^3 \leq (GrPr) \leq 1 \cdot 10^9; \\ C = 0,15, n = 0,33, & (GrPr) > 6 \cdot 10^{10}. \end{cases}$$

Прийняти: $t_c = 220^\circ\text{C}$; $t_m = 35^\circ\text{C}$ – температура, відповідно, батареї та навколишнього середовища; $d = 0,36$ м – діаметр циліндричної секції .

2.7. З резервуара, тиск та температура в якому стали величини ($P_0 = 6,3$ МПа; $T_0 = 370$ К), через конфузorne сопло, в апарат подається кисень, де тиск падає до P_{cp} . Показник адіабати кисню $k = 1,42$. Фізичні коефіцієнти: $R = 8314 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$; $\mu = 32$. Визначити швидкість V руху кисню та супутні величини за формулами:

$$\beta = \frac{P_{cp}}{P_0}; \quad \beta_{kp} = \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k+1}};$$

$$V = \begin{cases} \sqrt{\left[2 \frac{k}{k-1} \frac{R}{\mu} T_0 \left[1 - \left(\frac{P_{cp}}{P_0} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] \right]} & \text{при } \beta > \beta_{kp}; \\ \sqrt{\left[2 \frac{k}{k-1} \frac{R}{\mu} T_0 \right]} & \text{при } \beta \leq \beta_{kp}. \end{cases}$$

Прийняти $P_{cp} = 3,2$ МПа .

2.8. На циліндр, що складений з натягом $\delta = 12,3 \cdot 10^{-5}$ м з двох шарів розмірами $a = 0,2$ м, $b = 0,25$ м, $c = 0,33$ м, діє зовнішній ($P_3 = 330$ МПа) та внутрішній ($P_B = 78$ МПа) тиск. Модуль пружності матеріалу циліндра $E = 2,3 \cdot 10^5$ МПа . Визначити напруження σ_τ та супутні величини за формулами:

$$P = \frac{\delta E}{2b^3} \frac{(c^2 - b^2) \cdot (b^2 - a^2)}{c^2 - a^2};$$

$$\sigma_r = \sigma_1 + \sigma_2;$$

$$\sigma_2 = \frac{a^2 P_B^2 - c^2 P_3}{c^2 - a^2} - \frac{(P_B - P_3) a^2 c^2}{r^2 (c^2 - a^2)};$$

$$\sigma_1 = \begin{cases} -\frac{Pb^2}{b^2 - a^2} \left(1 + \frac{a^2}{r^2}\right), & a \leq r \leq b; \\ \frac{Pb^2}{c^2 - b^2} \left(1 + \frac{c^2}{r^2}\right), & b < r \leq c. \end{cases}$$

Прийняти: $r = 0,23$ м.

2.9. Визначати кількість теплоти Q (та супутні величини), яку втрачає плоска поверхня розмірами $l = 2$ м та $a = 1,5$ м, при температурі $t_{нов} = 120$ °С, якщо її повздовж обтікає потік повітря зі швидкістю V та температурою $t_{новім} = 20$ °С.

Фізичні параметри повітря: $\nu = 15,1 \cdot 10^{-6} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$, $\lambda = 0,0259 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$, $Pr = 0,703$.

Формули для розрахунку:

$$Q = \alpha(t_{нов} - t_{новім})S; \quad S = 2la; \quad \alpha = Nu \frac{\lambda}{l}; \quad Re = \frac{Vl}{\nu};$$

$$Nu = \begin{cases} 0,67 Re^{\frac{1}{2}} Pr^{\frac{1}{3}}, & Re < 5 \cdot 10^3; \\ 0,032 Re^{0,8}, & Re > 5 \cdot 10^5. \end{cases}$$

Прийняти: $V = 3,7 \frac{\text{м}}{\text{с}}$.

2.10. Визначити температуру T (та супутні величини) на відстані L від гарячої стінки камери печі. Стінка складається з шару червоної цегли (товщиною

$\delta_2 = 0,42$ м, теплопровідністю $\lambda_2 = 0,71 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$, її зовнішня поверхня нагріта до $T_3 = 40$ °С), та шару піношамоту ($\lambda_1 = 0,43 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$; $\delta_1 = 0,3$ м). Поверхня піношамоту, що у камері, нагріта до $T_B = 1090$ °С. Використовувати формули:

$$k = \left(\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} \right)^{-1}; \quad q = k(T_B - T_3); \quad T_c = T_B - q \frac{\delta_1}{\lambda_1};$$

$$T = \begin{cases} T_B - \frac{T_B - T_c}{\delta_1} L, & 0 < L \leq \delta_1; \\ T_c - \frac{T_c - T_3}{\delta_2} L, & \delta_1 < L \leq \delta_1 + \delta_2. \end{cases}$$

Прийняти: $L = 0,26$ м.

2.11. Знайти переміщення u , котрі виконують на відстані r від центру складового циліндра під дією внутрішнього тиску $P_0 = 56,2$ МПа, якщо $E = 2,1 \cdot 10^5$ МПа, $\mu = 0,3$, а геометричні параметри: $r_1 = 0,12$ м; $r_2 = 0,38$ м; $r_3 = 0,48$ м; $\delta = 1 \cdot 10^{-4}$ м.

Формули:

$$P = \frac{\delta E}{2r_2^3} \frac{(r_3^2 - r_2^2)(r_2^2 - r_1^2)}{(r_3^2 - r_1^2)}; \quad u = u_1 + u_2; \quad u_2 = \frac{r_1^2 P_0}{E(r_3^2 - r_1^2)} \left[(1 - \mu)r + \frac{(1 + \mu)r_3^2}{r} \right];$$

$$u_1 = \begin{cases} -\frac{r_2^2 P}{(r_2^2 - r_1^2)E} \left[(1 - \mu)r + \frac{(1 + \mu)r_1^2}{r} \right], & r_1 \leq r \leq r_2; \\ \frac{r_2^2 P}{(r_3^2 - r_2^2)E} \left[(1 - \mu)r + \frac{(1 + \mu)r_3^2}{r} \right], & r_2 < r \leq r_3. \end{cases}$$

Прийняти: $r = 0,44$ м.

2.12. Теплоізоляційна стінка складається з шару шамотної цегли (товщиною $\delta_1 = 0,24$ м), шару червоної цегли (товщиною $\delta_2 = 0,04$ м) та термоізоляції (товщиною $\delta_3 = 0,03$ м). Теплопровідність матеріалів, відповідно, $\lambda_1 = 0,93 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$; $\lambda_3 = 0,135 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$; $\lambda_2 = 0,68 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$. Температура середовища на кожній стороні стінки: $T_{\text{гор}} = 1500$ °С; $T_{\text{хол}} = 42$ °С. Коефіцієнти тепловіддачі, відповідно: $\alpha_{\text{гор}} = 840 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$; $\alpha_{\text{хол}} = 40 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$. Визначити температуру T на глибині x стінки.

Формули:

$$T_1 = T_{\text{гор}} - \frac{q}{\alpha_{\text{гор}}}; \quad T_2 = T_1 - \frac{\delta_1}{\lambda_1} q; \quad T_3 = T_2 - \frac{\delta_2}{\lambda_2} q; \quad T_4 = T_{\text{хол}} + \frac{q}{\lambda_{\text{хол}}};$$

$$q = k(T_{\text{гор}} - T_{\text{хол}});$$

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\lambda_{\text{гор}}} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} + \frac{1}{\alpha_{\text{хол}}}};$$

$$T = \begin{cases} T_1 - \frac{T_1 - T_2}{\delta_1} x, & 0 < x \leq \delta_1; \\ T_2 - \frac{T_2 - T_3}{\delta_2} x, & \delta_1 < x \leq \delta_1 + \delta_2; \\ T_3 - \frac{T_3 - T_4}{\delta_3} x, & \delta_1 + \delta_2 < x \leq \delta_1 + \delta_2 + \delta_3. \end{cases}$$

2.13. Визначити температуру T (та супутні величини) на глибині L в стінці термокамери, яка складається з магнезито-хромітового вогнетриву ($\delta_1 = 0,2$ м; $\alpha_1 = 4,3 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$) та легкої цегли ($\delta_2 = 0,08$ м; $\lambda_2 = 0,76 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$). Коефіцієнт тепловіддачі від газів з $T_{\text{газ}} = 1500$ °С до поверхні стінки $\lambda_c = 1150 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$. Температура ззовні камери $T_{\text{овім}} = 30$ °С. Питомий тепловий потік крізь стінку $q = 420 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$. Формули:

$$T_B = T_{\text{газ}} - \frac{q}{\alpha_1}; \quad T_3 = T_{\text{новим}} + \frac{q}{\alpha_2}; \quad T_C = T_3 + q \frac{\delta_2}{\lambda_2}; \quad \alpha_2 = \frac{q}{T_{\text{газ}} - T_{\text{новим}} - q \left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_1}{\lambda_2} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} \right)};$$

$$T = \begin{cases} T_B - \frac{T_B - T_C}{\delta_1} L, & 0 \leq L \leq \delta_1; \\ T_C - \frac{T_B - T_3}{\delta_2} L, & \delta_1 < L < \delta_1 + \delta_2. \end{cases}$$

Прийняти: $L=0,21$ м.

2.14. Пруток діаметром $d = 0,08$ м знаходиться в потоці газу, швидкість якого v . Фізичні властивості газу: $\nu_t = 18,02 \cdot 10^{-6} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$; $\lambda_t = 2,88 \cdot 10^{-2} \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$. Прийняти $v = 0,2 \frac{\text{м}}{\text{с}}$. Визначити коефіцієнт тепловіддачі α поверхні прутка до газу та супутні величини за формулами:

$$\alpha = \text{Nu} \frac{\lambda_t}{d};$$

$$\text{Re} = \frac{vd}{\nu_t};$$

$$\text{Nu} = \begin{cases} 0,43 \text{Re}^{0,51}, & 10 \leq \text{Re} \leq 1,3 \cdot 10^3; \\ 0,23 \text{Re}^{0,63}, & 1,3 \cdot 10^3 < \text{Re} \leq 2,3 \cdot 10^5. \end{cases}$$

2.15. Визначити величину теплового потоку q до повітря від труби діаметром $d = 0,012$ м, якщо труба має температуру $t_c = 85$ °С. Повітря має середню температуру $t_n = 20$ °С, рухається зі швидкістю $W = 1,2 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ та характеризується наступними теплофізичними величинами: $\nu_m = 13,09 \cdot 10^{-6} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$, $\lambda_m = 2,2 \cdot 10^{-2} \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$. Використані формули:

$$q = \alpha (t_c - t_m) \pi d ;$$

$$\alpha = 0,22 \operatorname{Re}^{0,6} \frac{\lambda_m}{d} \varepsilon ;$$

$$\operatorname{Re} = \frac{Wd}{\nu_m} .$$

Прийняти в залежності від кута атаки потоку повітря φ :

$$\varepsilon = \begin{cases} 1, & \varphi = 90^\circ; \\ 0,89, & \varphi = 60^\circ; \\ 0,6, & 60^\circ > \varphi \geq 30^\circ. \end{cases}$$

2.16. Визначати кількість теплоти Q (та супутні величини), яку втрачає плоска поверхня $b = 0,65$ м, $l = 1,1$ м, $t_{нов} = 100$ °С, якщо її повздовж обтікає потік повітря зі швидкістю W та температурою $t_{новім} = 12$ °С. Фізичні параметри повітря: $\nu = 16,01 \cdot 10^{-6} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$, $\lambda = 0,0255 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$, $Pr = 0,701$. Формули:

$$Q = \alpha (t_{нов} - t_{новім}) S ;$$

$$S = 2 la ; \quad \alpha = Nu \frac{\lambda}{l} ; \quad \operatorname{Re} = \frac{Wb}{\nu} ;$$

$$Nu = \begin{cases} 0,66 \operatorname{Re}^{\frac{1}{2}} \operatorname{Pr}^{\frac{1}{3}}, & \operatorname{Re} \leq 5 \cdot 10^3 ; \\ 0,032 \operatorname{Re}^{0,8}, & \operatorname{Re} > 5 \cdot 10^5 . \end{cases}$$

Взяти: $W = 3,7 \frac{\text{м}}{\text{с}}$.

2.17. Теплообмінна трубка охолоджується сумішшю газів. Зовнішній діаметр трубки $d = 0,0087$ м. Швидкість обтікання газів ν . Фізичні властивості

суміші: $\nu_T = 1,12 \cdot 10^{-6} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$; $\lambda_T = 2,13 \cdot 10^{-2} \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$. Прийняти $\nu = 0,33 \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$. Визначити коефіцієнт тепловіддачі α поверхні трубки до газів та супутні величини за формулами:

$$\alpha = \text{Nu} \frac{\lambda_T}{d}; \quad \text{Re} = \frac{\nu d}{\nu_T};$$

$$\text{Nu} = \begin{cases} 0,43 \text{Re}^{0,51}, & 10 \leq \text{Re} \leq 1,3 \cdot 10^3; \\ 0,23 \text{Re}^{0,63}, & 1,3 \cdot 10^3 < \text{Re} \leq 2,3 \cdot 10^5. \end{cases}$$

2.18. Пруток діаметром $d = 24$ мм, охолоджується рідиною, параметри якої:

$\nu = 1,66 \cdot 10^{-6} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$; $\lambda = 0,76 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$; $Pr = 8,67$; $Pr_c = 4,1$. Визначити коефіцієнт тепловіддачі поверхні прутка за формулами:

$$\alpha = \text{Nu} \frac{\lambda}{d}; \quad \text{Re} = U d / \nu;$$

$$\text{Nu} = \begin{cases} 0,5 \text{Re}^{0,5} Pr^{0,38} \left(\frac{Pr}{Pr_c} \right)^{0,25}, & 8 \leq \text{Re} \leq 1 \cdot 10^3; \\ 0,25 \text{Re}^{0,6} Pr^{0,38} \left(\frac{Pr}{Pr_c} \right)^{0,25}, & 1 \cdot 10^3 < \text{Re} \leq 2 \cdot 10^5. \end{cases}$$

Прийняти швидкість потоку рідини $U = 0,735 \frac{\text{м}}{\text{с}}$.

2.19. Потік повітря обтікає крило літака із швидкістю $V = 4 \frac{\text{м}}{\text{с}}$. Визначити

кількість теплоти Q (та супутні величини), яку втрачає поверхня крила завдовжки $l = 2$ м, завширшки $a = 1,5$ м, температурою $t_{нов} = 120$ °С. Температура повітря $t_{новім} = 8$ °С. Фізичні параметри повітря: $\nu = 15,8 \cdot 10^{-6} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$, $\lambda = 0,029 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$, $Pr = 0,7$. Формули:

$$Q = \alpha(t_{\text{нов}} - t_{\text{ноєім}})S;$$

$$S = 2la;$$

$$\alpha = Nu \frac{\lambda}{l};$$

$$Re = \frac{Vl}{\nu};$$

$$Nu = \begin{cases} 0,67 Re^{\frac{1}{2}} Pr^{\frac{1}{3}}, & Re < 5 \cdot 10^3; \\ 0,032 Re^{0,8}, & Re > 5 \cdot 10^5. \end{cases}$$

2.20. Фізичні величини середовища, в якому знаходиться теплообмінна секція діаметром $d = 0,25$ м: $\nu_m = 13,1 \cdot 10^{-6} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$; $\lambda_m = 1,96 \cdot 10^{-2} \frac{\text{Вт}}{\text{мК}}$; $Pr = 0,71$; $g = 9,81 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$. Температура, відповідно, секції та навколишнього середовища: $t_c = 120$ °С; $t_m = 18$ °С.

Визначити величину теплового потоку Q з поверхні циліндричної секції в оточуюче середовище (та супутні величини). Формули:

$$Q = \alpha(t_c - t_m)\pi d l;$$

$$Nu = C(GrPr)^n;$$

$$\alpha = Nu \frac{\lambda_m}{d};$$

$$GrPr = \frac{gd^3 \beta(t_c - t_m)}{\nu_m^2} Pr;$$

$$\beta = \frac{1}{273 + t_m};$$

$$\begin{cases} C = 0,71, n = 0,24, & 1 \cdot 10^3 \leq (GrPr) \leq 1,2 \cdot 10^9; \\ C = 0,18, n = 0,35, & (GrPr) > 6,1 \cdot 10^{10}. \end{cases}$$

2.21. Визначати коефіцієнт тепловіддачі α , Вт/(м²·К) від вертикального паропроводу до повітря та супутні величини, якщо його діаметр $d = 1 \cdot 10^{-2}$ м і висота $h = 4$ м, та визначальна температура $t_0 = 100$ °С, при якій відомі такі теплофізичні властивості повітря: $\nu = 2,3$ м²/с, $\lambda = 0,032$ Вт/(м·К), $Pr = 0,688$. Також задані константи: $\beta = 2,9 \cdot 10^{-3}$ 1/К, $g = 9,81$ м/с² і різниця між температурами паропроводу і середовища $\Delta t = 150$ °С. Формули для розрахунку:

$$Nu = \begin{cases} 0,54 \cdot (Gr \cdot Pr)^{\frac{1}{4}}, & 4,5 \cdot 10^2 \leq (Gr \cdot Pr) < 2 \cdot 10^7; \\ 0,135 (Gr \cdot Pr)^{\frac{1}{3}}, & 2 \cdot 10^7 \leq (Gr \cdot Pr) \leq 1 \cdot 10^{13}. \end{cases}$$

$$\alpha = Nu \frac{\lambda}{h};$$

$$Gr = \frac{g \cdot h^3}{\nu^2} \cdot \beta \cdot \Delta t.$$

2.22. На циліндр що складений з натягом $\delta = 12,3 \cdot 10^{-5}$ м з двох шарів розмірами $a = 0,12$ м, $b = 0,20$ м, $c = 0,36$ м, діє зовнішній $P_3 = 280$ МПа та внутрішній $P_B = 60$ МПа тиск. Модуль пружності матеріалу циліндра $E = 2,3 \cdot 10^5$ МПа. Визначити напруження σ_r та супутні величини за формулами:

$$P = \frac{\delta E}{2b^3} \frac{(c^2 - b^2) \cdot (b^2 - a^2)}{c^2 - a^2};$$

$$\sigma_r = \sigma_1 + \sigma_2;$$

$$\sigma_2 = \frac{a^2 P_B^2 - c^2 P_3}{c^2 - a^2} - \frac{(P_B - P_3) a^2 c^2}{r^2 (c^2 - a^2)};$$

$$\sigma_1 = \begin{cases} -\frac{P b^2}{b^2 - a^2} \left(1 + \frac{a^2}{r^2} \right), & a \leq r \leq b; \\ \frac{P b^2}{c^2 - b^2} \left(1 + \frac{c^2}{r^2} \right), & b < r \leq c. \end{cases}$$

Прийняти: $r = 0,18$ м .

2.23. Визначити величину теплового потоку q від калорифера діаметром $d = 0,012$ м до повітря, якщо калорифер має температуру $t_c = 70$ °С. Повітря має середню температуру $t_n = 22$ °С, рухається зі швидкістю $V = 2,2 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ та характеризується наступними теплофізичними величинами: $\nu_m = 15,061 \cdot 10^{-6} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$,

$\lambda_m = 2,6 \cdot 10^{-2} \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$. Використані формули:

$$q = \alpha (t_c - t_m) \pi d; \quad \alpha = \text{Nu}_m \frac{\lambda_m}{d} \varepsilon;$$

$$\text{Nu}_m = 0,22 \text{Re}^{0,6}; \quad \text{Re} = \frac{Vd}{\nu_m}.$$

$$\varepsilon = \begin{cases} 1; & \varphi = 90^\circ; \\ 0,8; & \varphi = 60^\circ; \\ 0,92; & 120^\circ > \varphi > 90^\circ. \end{cases}$$

Де φ - кут атаки потоку повітря.

2.24. Знайти коефіцієнт тепловіддачі α , Вт/(м² К) від горизонтального трубопроводу до повітря та супутні величини, якщо його діаметр $d = 6,2 \cdot 10^{-2}$ м і довжина $L = 0,8$ м, температура стінки трубопроводу $t_1 = 118$ °С, а температура середовища $t_{\text{сер}} = 24$ °С. Визначальна температура процесу $t_0 = 71$ °С, при якій відомі теплофізичні властивості повітря: $P_r = 0,693$, $\beta = 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ 1/К}$,

$$\nu = 1,95 \cdot 10^{-5} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}, \quad \lambda = 2,97 \cdot 10^{-2} \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}.$$

Задано прискорення вільного падіння $g = 9,81 \text{ м/с}^2$. Формули для розрахунку:

$$Nu = \begin{cases} 0,54 \cdot (Gr \cdot Pr)^{\frac{1}{4}}, & 4,5 \cdot 10^2 \leq (Gr \cdot Pr) < 2 \cdot 10^7; \\ 0,135 (Gr \cdot Pr)^{\frac{1}{3}}, & 2 \cdot 10^7 \leq (Gr \cdot Pr) \leq 1 \cdot 10^{13}. \end{cases}$$

$$\alpha = Nu \frac{\lambda}{d}; \quad \Delta t = t_1 - t_{\text{сеп}};$$

$$Gr = \frac{g \cdot d^3}{\nu^2} \cdot \beta \cdot \Delta t.$$

2.25. Визначати коефіцієнт тепловіддачі α , $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$ у повітря від зігнутої труби діаметром $d = 6 \cdot 10^{-2}$ м і довжиною $L = 2,1$ м до повітря (та супутні величини), якщо температура повітря $t_{\text{сеп}} = 100$ °С, а стінки труби $t_{\text{ст}} = 20$ °С. Визначальна температура процесу $t_0 = 60$ °С, при якій задані теплофізичні властивості повітря: $\nu = 23,13 \cdot 10^{-2} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$, $\lambda = 3,21 \cdot 10^{-2} \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$, $Pr_p = Pr_{\text{cm}} = 0,7$. Задані швидкість повітря $v = 5$ м/с, прискорення вільного падіння $g = 9,81$ м/с².
Формули для розрахунку:

$$Nu = \begin{cases} 2,26 \cdot 10^{-4} \cdot Re^{1,3} \cdot Pr_p^{0,43} \cdot \left(\frac{Pr_p}{Pr_{\text{cm}}} \right)^{0,25}, & 2,2 \cdot 10^3 \leq Re < 1 \cdot 10^4; \\ 0,021 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr_p^{0,43} \cdot \left(\frac{Pr_p}{Pr_{\text{cm}}} \right)^{0,25}, & 1 \cdot 10^4 \leq Re < 5 \cdot 10^6. \end{cases}$$

$$\alpha = Nu \frac{\lambda}{d}; \quad Re = \frac{v \cdot d}{\nu}.$$

2.26. Відомі фізичні константи рідини, яка протікає по трубопроводу:
 $\lambda = 0,103 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$; $Cp = 2,04 \cdot 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$; $\mu_c = 0,198 \cdot 10^3$ Па·с; $\mu_{\text{жс}} = 29,7$ Па·с;
геометричні розміри: $l = 1,1$ м; $d = 0,072$ м. Визначити коефіцієнт опору тертю ε при в'язкій течії рідини за формулами:

$$\varepsilon = \varepsilon_k \left(\frac{\mu_c}{\mu_{жс}} \right)^n; \quad \varepsilon_k = \frac{64}{Re}; \quad \pi = 3,1415; \quad Pe \frac{l}{d} = \frac{4G}{\pi d} \frac{Cp}{\lambda};$$

$$\begin{cases} C = 2,31; m = -0,3, & \text{якщо } 130 < Pe \frac{l}{d} \leq 1500; \\ C = 0,535; m = -0,1, & \text{якщо } Pe \frac{l}{d} > 1500; \end{cases}$$

$$n = C \left(Pe \frac{l}{d} \right)^m \left(\frac{\mu_c}{\mu_{жс}} \right)^{-0,9}.$$

Прийняти: $G = 2,3 \cdot 10^{-5}$; $Re = 1300$.

27. Мідний дріт діаметром $d = 0,02$ м підвішений в потоці повітря, швидкість якого v , фізичні властивості: $\nu_T = 15,06 \cdot 10^{-6} \frac{m^2}{c}$; $\lambda_T = 2,6 \cdot 10^{-2} \frac{Вт}{м \cdot K}$.

Прийняти $v = 1,2 \frac{м}{с}$. Визначити коефіцієнт тепловіддачі α поверхні дроту до повітря та супутні величини за формулами:

$$\alpha = Nu_T \frac{\lambda_T}{d}; \quad Re = \frac{vd}{\nu_T};$$

$$Num = \begin{cases} 0,44 Re^{0,5}, & 10 \leq Re \leq 1 \cdot 10^3; \\ 0,22 Re^{0,6}, & 1 \cdot 10^3 < Re \leq 2 \cdot 10^5. \end{cases}$$

28. Трубка діаметром $d = 12$ мм, охолоджується розчином, параметри якого: $\nu = 1,3 \cdot 10^{-6} \frac{м^2}{с}$; $\lambda = 0,572 \frac{Вт}{м \cdot K}$; $Pr = 9,4$; $Pr_c = 3,6$. Визначити коефіцієнт тепловіддачі поверхні трубки α за формулами:

$$\alpha = Nu \frac{\lambda}{d}; \quad Re = \frac{Ud}{\nu};$$

$$Nu = \begin{cases} 0,5Re^{0,5}Pr^{0,38}\left(\frac{Pr}{Pr_c}\right)^{0,25}, & 8 \leq Re \leq 1 \cdot 10^3; \\ 0,25Re^{0,6}Pr^{0,38}\left(\frac{Pr}{Pr_c}\right)^{0,25}, & 1 \times 10^3 < Re \leq 2 \cdot 10^5. \end{cases}$$

Прийняти швидкість потоку розчину $U = 0,85 \frac{м}{с}$.

2.29. Розрахувати коефіцієнт тепловіддачі α , Вт/(м² К) від вертикального трубопроводу до повітря та супутні величини, якщо його діаметр $d = 1,1 \cdot 10^{-2}$ м і $H = 4,2$ м, температура $t_1 = 170$ °С, а температура середовища $t_{сер} = 30$ °С. Визначальна температура процесу $t_0 = 100$ °С, при якій відомі теплофізичні властивості повітря: $\nu = 2,2312 \cdot 10^{-5}$ м²/с, $\lambda = 0,031$ Вт/(м К), $Pr = 0,692$, $\beta = 2,8 \cdot 10^{-3}$ К⁻¹. Відомо $g = 9,81$ м/с². Формули для розрахунку:

$$\alpha = Nu \frac{\lambda}{H}; \Delta t = t_1 - t_{сер};$$

$$Gr = \frac{g \cdot H^3}{\nu^2} \cdot \beta \cdot \Delta t;$$

$$Nu = \begin{cases} 0,54 \cdot (Gr \cdot Pr)^{\frac{1}{4}}, & 4,5 \cdot 10^2 \leq (Gr \cdot Pr) < 2 \cdot 10^7; \\ 0,135 (Gr \cdot Pr)^{\frac{1}{3}}, & 2 \cdot 10^7 \leq (Gr \cdot Pr) \leq 1 \cdot 10^{13}. \end{cases}$$

2.30. Теплоізоляційна стінка складається з шару шамотної цегли (товщина шару $\delta_1 = 0,24$ м), шару червоної цегли (товщина шару $\delta_2 = 0,12$ м) та шару захисного покриття (товщина шару $\delta_3 = 0,02$ м). Теплопровідність матеріалів, відповідно, $\lambda_1 = 0,93 \frac{Вт}{м \cdot К}$; $\lambda_3 = 0,135 \frac{Вт}{м \cdot К}$; $\lambda_2 = 0,68 \frac{Вт}{м \cdot К}$. Температура середовища на кожній стороні стінки: $T_{гор} = 1500$ °С; $T_{хол} = 42$ °С. Коефіцієнти тепловіддачі, відповідно: $\alpha_{гор} = 840 \frac{Вт}{м^2 \cdot К}$; $\alpha_{хол} = 40 \frac{Вт}{м^2 \cdot К}$. Визначити температуру T на глибині x стінки. Формули:

$$q = k(T_{\text{гор}} - T_{\text{хол}}) ;$$

$$T_1 = T_{\text{гор}} - \frac{q}{\alpha_{\text{гор}}} ; \quad T_2 = T_1 - \frac{\delta_1}{\lambda_1} q ; \quad T_3 = T_2 - \frac{\delta_2}{\lambda_2} q ; \quad T_4 = T_{\text{хол}} + \frac{q}{\alpha_{\text{хол}}} ;$$

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{\text{гор}}} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} + \frac{1}{\alpha_{\text{хол}}}}$$

$$T = \begin{cases} T_1 - \frac{T_1 - T_2}{\delta_1} x, & 0 < x \leq \delta_1 ; \\ T_2 - \frac{T_2 - T_3}{\delta_2} x, & \delta_1 < x \leq \delta_2 + \delta_1 ; \\ T_3 - \frac{T_3 - T_4}{\delta_3} x, & \delta_2 < x \leq \delta_3 + \delta_2 + \delta_1 . \end{cases}$$

Прийняти $x = 0,2$ м.

2.31. Визначити температуру T на глибині L стінки сушильної камери виготовленої з червоної цегли товщиною $\delta_1 = 0,25$ м, теплопровідністю $\lambda_1 = 0,7 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{с}}$, що покрита ззовні термопокриттям товщиною δ_2 (значення вивести на друк), теплопровідність $\lambda_2 = 0,047 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$. Питомі втрати теплоти крізь стінку складають $q = 112 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$. Температура стінок камери: внутрішньої – $T_B = 100$ °С, зовнішньої – $T_3 = 25$ °С . Формули:

$$\delta_2 = \lambda_2 \frac{T_B - T_3}{q} ;$$

$$T_C = T_3 + q \frac{\delta_2}{\lambda_2} ;$$

$$T = \begin{cases} T_B - \frac{T_B - T_C}{\delta_1} L, & 0 \leq L \leq \delta_1; \\ T_C - \frac{T_C - T_3}{\delta_2} L, & \delta_1 < L \leq \delta_2 + \delta_1. \end{cases}$$

Прийняти: $L = 0,21 \text{ м}$.

2.32. Визначити величину теплового потоку Q з поверхні циліндричної секції батареї в оточуюче середовище, якщо фізичні коефіцієнти:

$$\nu_m = 16,1 \cdot 10^{-6} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}; \lambda_m = 2,66 \cdot 10^{-2} \frac{\text{Вт}}{\text{мК}}; \beta = \frac{1}{273 + t_m}; Pr = 0,7; g = 9,81 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}. \text{ Формули:}$$

$$Q = \alpha(t_c - t_m) \pi d l;$$

$$Nu = C(GrPr)^n; \quad \alpha = Nu \frac{\lambda_m}{d};$$

$$GrPr = \frac{g d^3 \beta (t_c - t_m)}{\nu_m^2} Pr;$$

$$\begin{cases} C = 0,75, n = 0,25, & 1 \cdot 10^3 \leq (GrPr) \leq 1 \cdot 10^9; \\ C = 0,15, n = 0,33, & (GrPr) > 6 \cdot 10^{10}. \end{cases}$$

Прийняти: $t_c = 220 \text{ } ^\circ\text{C}$; $t_m = 35 \text{ } ^\circ\text{C}$ – температура, відповідно, батареї та навколишнього середовища; $d = 0,36 \text{ м}$ – діаметр циліндричної секції.

2.33. З резервуара, тиск та температура в якому сталі величини ($P_0 = 6,3 \text{ МПа}$; $T_0 = 370 \text{ К}$), через конфузорне сопло, у апарат подається кисень, де тиск падає до P_{cp} . Показник адіабати кисню $k = 1,42$. Фізичні коефіцієнти відомі: $R = 8314 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$; $\mu = 32$. Визначити швидкість V втікання кисню та супутні величини за формулами:

$$\beta = \frac{P_{cp}}{P_0};$$

$$\beta_{кр} = \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k+1}};$$

$$V = \begin{cases} \sqrt{\left[2 \frac{k}{k-1} \frac{R}{\mu} T_0 \left[1 - \left(\frac{P_{cp}}{P_0} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] \right]} & \text{при } \beta > \beta_{кр}; \\ \sqrt{\left[2 \frac{k}{k-1} \frac{R}{\mu} T_0 \right]} & \text{при } \beta \leq \beta_{кр}. \end{cases}$$

Прийняти $P_{cp} = 3,2$ МПа .

2.34. Знайти коефіцієнт тепловіддачі α , Вт/(м² К), від горизонтального паропроводу до повітря та супутні величини, якщо його діаметр $d = 6 \cdot 10^{-2}$ м і довжина $L = 4$ м, якщо визначальна температура $t_0 = 69$ °С, при якій відомі такі теплофізичні властивості повітря: $P_r = 0,690$, $\beta = 3,0 \cdot 10^{-3}$ 1/К; $\nu = 1,92 \cdot 10^{-5} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$; $\lambda = 2,95 \cdot 10^{-2} \frac{\text{Вт}}{\text{мК}}$; $g = 9,81 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$. Різниця між температурою паропроводу і середовища $\Delta t = 105$ °С. Формули для розрахунку:

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

$$Gr = \frac{g \cdot d^3}{\nu^2} \cdot \beta \cdot \Delta t;$$

$$Nu = \begin{cases} 0,54 \cdot (Gr \cdot Pr)^{\frac{1}{4}}, & 4,5 \cdot 10^2 \leq (Gr \cdot Pr) < 2 \cdot 10^7; \\ 0,135 (Gr \cdot Pr)^{\frac{1}{3}}, & 2 \cdot 10^7 \leq (Gr \cdot Pr) \leq 1 \cdot 10^{13}. \end{cases}$$

2.35. Визначати коефіцієнт тепловіддачі α , $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$, у повітря від зігнутої труби діаметром $d = 6 \cdot 10^{-2}$ м і довжиною $L = 2,1$ м до повітря (та супутні

величини), якщо температура повітря $t_{cep} = 100$ °С, а стінки труби $t_{cm} = 20$ °С. Визначальна температура процесу $t_0 = 60$ °С, при якій задані теплофізичні властивості повітря: $\nu = 22,92 \cdot 10^{-2} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$; $\lambda = 2,95 \cdot 10^{-2} \frac{\text{Вт}}{\text{мК}}$; $Pr_p = Pr_{cm} = 0,7$. Задані константи: $n = 0,43$; $m = 0,8$; $k = 0,25$; $p = 1,3$; $g = 9,81 \text{ м/с}^2$. Прийняти: швидкість повітря $v = 5 \text{ м/с}$. Формули для розрахунку:

$$\alpha = Nu \frac{\lambda}{d}; \quad Re = \frac{v \cdot d}{\nu};$$

$$Nu = \begin{cases} 2,26 \cdot 10^{-4} \cdot Re^p \cdot Pr_p^n \cdot \left(\frac{Pr_p}{Pr_{cm}} \right)^k, & 2,3 \cdot 10^3 \leq Re < 1,1 \cdot 10^4; \\ 0,021 \cdot Re^m \cdot Pr_p^n \cdot \left(\frac{Pr_p}{Pr_{cm}} \right)^k, & 1,1 \cdot 10^4 \leq Re < 4,8 \cdot 10^6. \end{cases}$$

2.36. Визначати кількість теплоти Q (та супутні величини), яку втрачає плоска поверхня розмірами $l = 2 \text{ м}$, $a = 1,5 \text{ м}$, при температурі $t_{нов} = 120$ °С, якщо її повздовж обтікає потік газу зі швидкістю V та температурою $t = 20$ °С. Фізичні параметри газу: $\nu = 15,1 \cdot 10^{-6} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$, $\lambda = 0,0259 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$, $Pr = 0,703$. Формули:

$$S = 2la; \quad \alpha = Nu \frac{\lambda}{l}; \quad Re = \frac{Vl}{\nu}; \quad Nu = \begin{cases} 0,67 Re^{\frac{1}{2}} Pr^{\frac{1}{3}}, & Re < 5 \cdot 10^3; \\ 0,032 Re^{0,8}, & Re > 5 \cdot 10^3; \end{cases}$$

$$Q = \alpha (t_{нов} - t) S$$

$$\text{Взяти: } V = 3,7 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

2.37. Визначити температуру T (та супутні величини) на відстані L від поверхні гарячої стінки камери печі. Стінка складається з шару червоної цегли (товщиною $\delta_2 = 0,42 \text{ м}$, теплопровідністю $\lambda_2 = 0,71 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$, її зовнішня поверхня

нагріта до $T_3 = 40^\circ\text{C}$), та шару піношамоту ($\lambda_1 = 0,43 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$; $\delta_1 = 0,3 \text{ м}$). Поверхня піношамоту, що у камері, нагріта до $T_B = 1090^\circ\text{C}$. Формули:

$$T_C = T_B - q \frac{\delta_1}{\lambda_1};$$

$$k = \left(\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} \right)^{-1}; \quad q = k(T_B - T_3);$$

$$T = \begin{cases} T_B - \frac{T_B - T_C}{\delta_1} L, & 0 < L \leq \delta_1; \\ T_C - \frac{T_C - T_3}{\delta_2} L, & \delta_1 < L \leq \delta_2 + \delta_1. \end{cases}$$

Прийняти: $L = 0,34 \text{ м}$.

2.38. Знайти переміщення u , котрі відбуваються на відстані r від центру складового циліндру під дією внутрішнього тиску $P_0 = 56,2 \text{ МПа}$, якщо $E = 2,1 \cdot 10^5 \text{ МПа}$, $\mu = 0,3$, а геометричні параметри складового циліндру: $r_1 = 0,12 \text{ м}$; $r_2 = 0,38 \text{ м}$; $r_3 = 0,48 \text{ м}$; $\delta = 1 \cdot 10^{-4} \text{ м}$. Формули:

$$P = \frac{\delta E}{2r_2^3} \frac{(r_3^2 - r_2^2)(r_2^2 - r_1^2)}{(r_3^2 - r_1^2)};$$

$$u = u_1 + u_2;$$

$$u_2 = \frac{r_1^2 P_0}{E(r_3^2 - r_1^2)} \left[(1 - \mu)r + \frac{(1 + \mu)r_3^2}{r} \right];$$

$$u_1 = \begin{cases} -\frac{r_2^2 P}{(r_2^2 - r_1^2)E} \left[(1 - \mu)r + \frac{(1 + \mu)r_1^2}{r} \right], & r_1 \leq r \leq r_2; \\ \frac{r_2^2 P}{(r_3^2 - r_2^2)E} \left[(1 - \mu)r + \frac{(1 + \mu)r_3^2}{r} \right], & r_2 < r \leq r_3. \end{cases}$$

Прийняти: $r = 0,44 \text{ м}$.

2.39. Визначати коефіцієнт тепловіддачі α , $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$, від вертикального паропроводу до повітря та супутні величини, якщо його діаметр $d = 1 \cdot 10^{-2}$ м і висота $h = 4$ м та відомі такі теплофізичні властивості повітря:, $\lambda = 0,032 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$, $Pr = 0,688$. Також задані $\beta = 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ 1/К}$, $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ і різниця між температурою паропроводу і середовища $\Delta t = 150 \text{ }^\circ\text{С}$. Формули для розрахунку:

$$Nu = \begin{cases} 0,54 \cdot (Gr \cdot Pr)^{\frac{1}{4}}, & 4,5 \cdot 10^2 \leq (Gr \cdot Pr) < 2 \cdot 10^7; \\ 0,135 (Gr \cdot Pr)^{\frac{1}{3}}, & 2 \cdot 10^7 \leq (Gr \cdot Pr) \leq 1 \cdot 10^{13}; \end{cases}$$

$$\alpha = Nu \frac{\lambda}{h}; \quad Gr = \frac{g \cdot h^3}{\nu^2} \cdot \beta \cdot \Delta t.$$

Прийняти: $\nu = 2,3 \cdot 10^{-5} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$.

2.40. Розрахувати коефіцієнт тепловіддачі α , $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$ від вертикального трубопроводу до повітря та супутні величини, якщо його визначальний розмір H (прийняти $H = 4,2$ м), температура $t_1 = 170 \text{ }^\circ\text{С}$, а температура середовища $t_{\text{сеп}} = 30 \text{ }^\circ\text{С}$. Відомі теплофізичні властивості повітря: $\nu = 2,313 \cdot 10^{-5} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$, $\lambda = 0,031 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$, $Pr = 0,692$, $\beta = 2,8 \cdot 10^{-3} \text{ 1/К}$. Задано $g = 9,81 \text{ м/с}^2$. Формули для розрахунку:

$$\Delta t = t_1 - t_{\text{сеп}}; \quad \alpha = Nu \frac{\lambda}{H};$$

$$Gr = \frac{g \cdot H^3}{\nu^2} \cdot \beta \cdot \Delta t;$$

$$Nu = \begin{cases} 0,54 \cdot (Gr \cdot Pr)^{\frac{1}{4}}, & 4,5 \cdot 10^2 \leq (Gr \cdot Pr) < 2 \cdot 10^7; \\ 0,135 (Gr \cdot Pr)^{\frac{1}{3}}, & 2 \cdot 10^7 \leq (Gr \cdot Pr) \leq 1 \cdot 10^{13}. \end{cases}$$

2.41. Визначити температуру T (та супутні величини) на глибині L в стінці термокамери, яка складається з магнезито-хромітового вогнетриву ($\delta_1 = 0,2$ м; $\lambda_1 = 4,3 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$) та легкої цегли ($\delta_2 = 0,08$ м; $\lambda_2 = 0,76 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$). Коефіцієнт тепловіддачі від газів з $T_{\text{газ}} = 1500$ °С до поверхні стінки $\alpha_1 = 1150 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$. Температура ззовні камери $T_{\text{зовні}} = 30$ °С. Питомий тепловий потік крізь стінку $q = 420 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$. Формули:

$$T_B = T_{\text{газ}} - \frac{q}{\alpha_1}; \quad T_3 = T_{\text{зовні}} + \frac{q}{\alpha_2}; \quad T_C = T_3 + q \frac{\delta_2}{\lambda_2}; \quad \alpha_2 = \frac{q}{T_{\text{газ}} - T_{\text{зовні}} - q \left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} \right)};$$

$$T = \begin{cases} T_B - \frac{T_B - T_C}{\delta_1} L, & 0 \leq L \leq \delta_1; \\ T_C - \frac{T_B - T_3}{\delta_2} L, & \delta_1 < L < \delta_1 + \delta_2. \end{cases}$$

Прийняти: $L = 0,21$ м.

2.42. Пруток діаметром $d = 0,08$ м знаходиться в потоці газу, швидкість якого v . Фізичні властивості газу: $\nu_T = 18,02 \cdot 10^{-6} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$; $\lambda_T = 2,88 \cdot 10^{-2} \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$. Прийняти $v = 0,2 \frac{\text{м}}{\text{с}}$. Визначити коефіцієнт тепловіддачі α з поверхні прутка до газу та супутні величини за формулами:

$$\alpha = \text{Nu} \frac{\lambda_T}{d}; \quad \text{Re} = \frac{v d}{\nu_T};$$

$$Nu = \begin{cases} 0,43 Re^{0,51}, & 10 \leq Re \leq 1,3 \cdot 10^3; \\ 0,23 Re^{0,63}, & 1,3 \cdot 10^3 < Re \leq 2,3 \cdot 10^5. \end{cases}$$

2.43. Знайти коефіцієнт тепловіддачі α , $\frac{Вт}{м^2 \cdot К}$, від горизонтального паропроводу до повітря та супутні величини, якщо його діаметр d (прийняти умовно $d = 6 \cdot 10^{-2}$ м), якщо відомі такі теплофізичні властивості повітря: $\nu = 1,92 \cdot 10^{-5} \frac{м^2}{с}$, $\lambda = 0,0295 \frac{Вт}{м \cdot К}$, $Pr = 0,690$, $\beta = 3,0 \cdot 10^{-3} 1/К$. Задано також прискорення вільного падіння $g = 9,81 м/с^2$. Різниця між температурою паропроводу і середовища $\Delta t = 105 ^\circ C$. Формули для розрахунку:

$$Gr = \frac{g \cdot d^3}{\nu^2} \cdot \beta \cdot \Delta t; \quad \alpha = Nu \frac{\lambda}{d};$$

$$Nu = \begin{cases} 0,54 \cdot (Gr \cdot Pr)^{\frac{1}{4}}, & 4,5 \cdot 10^2 \leq (Gr \cdot Pr) < 2 \cdot 10^7; \\ 0,135 (Gr \cdot Pr)^{\frac{1}{3}}, & 2 \cdot 10^7 \leq (Gr \cdot Pr) \leq 1 \cdot 10^{13}. \end{cases}$$

2.44. Визначити величину теплового потоку q від труби гарячого водопостачання діаметром $d = 0,012$ м до повітря, якщо труба має температуру стінки $t_c = 85 ^\circ C$. Повітря має середню температуру $t_n = 20 ^\circ C$, рухається зі швидкістю $W = 1,2 \frac{м}{с}$ та характеризується наступними теплофізичними величинами: $\nu_m = 13,09 \cdot 10^{-6} \frac{м^2}{с}$, $\lambda_m = 2,2 \cdot 10^{-2} \frac{Вт}{м \cdot К}$. Використані формули:

$$q = \alpha (t_c - t_n) \pi d;$$

$$\alpha = 0,22 Re^{0,6} \frac{\lambda_m}{d} \varepsilon;$$

$$Re = \frac{Wd}{\nu_m}.$$

Прийняти в залежності від кута атаки потоку повітря φ :

$$\varepsilon = \begin{cases} 1, & \varphi = 90^\circ; \\ 0,89, & \varphi = 60^\circ; \\ 0,6, & 60^\circ > \varphi \geq 30^\circ. \end{cases}$$

2.45. Визначати кількість теплоти Q (та супутні величини), яку втрачає плоска поверхня з розмірами $b = 0,65$ м, $l = 1,1$ м, при температурі $t_{нов} = 100$ °С, якщо її повздовж обтікає потік повітря, зі швидкістю W та сталою температурою $t_{новім} = 12$ °С. Фізичні параметри повітря: $\nu = 16,01 \cdot 10^{-6} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$, $\lambda = 0,0255 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$, $Pr = 0,701$.

Формули:

$$Q = \alpha(t_{нов} - t_{новім})S;$$

$$S = 2la;$$

$$\alpha = Nu \frac{\lambda}{l}; \quad Re = \frac{Wb}{\nu};$$

$$Nu = \begin{cases} 0,66 Re^{\frac{1}{2}} Pr^{\frac{1}{3}}, & Re \leq 5 \cdot 10^3; \\ 0,032 Re^{0,8}, & Re > 5 \cdot 10^5. \end{cases}$$

Взяти: $W = 3,7 \frac{\text{м}}{\text{с}}$.

2.46. Теплообмінна трубка охолоджується сумішшю газів. Зовнішній діаметр трубки $d = 0,0087$ м. Швидкість обтікання газів ν . Фізичні властивості суміші: $\nu_m = 1,12 \cdot 10^{-6} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$; $\lambda_m = 2,13 \times 10^{-2} \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$. Прийняти $\nu = 0,33 \frac{\text{м}}{\text{с}}$. Визначити коефіцієнт тепловіддачі α поверхні трубки до газів та супутні величини за формулами:

$$\alpha = \text{Nu} \frac{\lambda_T}{d};$$

$$\text{Re} = \frac{vd}{\nu_T};$$

$$\text{Nu} = \begin{cases} 0,43 \text{Re}^{0,51}, & 10 \leq \text{Re} \leq 1,3 \cdot 10^3; \\ 0,23 \text{Re}^{0,63}, & 1,3 \cdot 10^3 < \text{Re} \leq 2,3 \cdot 10^5. \end{cases}$$

2.47. Пруток діаметром $d = 24$ мм, охолоджується рідиною, параметри якої:

$\nu = 1,66 \cdot 10^{-6} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}; \lambda = 0,76 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}; Pr = 8,67; Pr_c = 4,1$. Визначити коефіцієнт тепловіддачі поверхні прутка за формулами:

$$\alpha = \text{Nu} \frac{\lambda}{d}; \quad \text{Re} = \frac{Ud}{\nu};$$

$$\text{Nu} = \begin{cases} 0,5 \text{Re}^{0,5} Pr^{0,38} \left(\frac{Pr}{Pr_c} \right)^{0,25}, & 8 \leq \text{Re} \leq 1 \cdot 10^3; \\ 0,25 \text{Re}^{0,6} Pr^{0,38} \left(\frac{Pr}{Pr_c} \right)^{0,25}, & 1 \cdot 10^3 < \text{Re} \leq 2,2 \cdot 10^5. \end{cases}$$

Прийняти швидкість потоку рідини $U = 0,735 \frac{\text{м}}{\text{с}}$.

2.48. Потік повітря обтікає крило літака із швидкістю V . Визначати кількість теплоти Q (та супутні величини), яку втрачає поверхня крила розмірами $l = 2$ м, $h = 1,5$ м, при $t_{\text{нов}} = 120$ °С. Прийняти $V = 4 \frac{\text{м}}{\text{с}}$. Температура повітря

$t_{\text{новім}} = 8$ °С. Фізичні параметри повітря: $\nu = 15,8 \cdot 10^{-6} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}, \lambda = 0,029 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}, Pr = 0,7$.

Формули:

$$Q = \alpha(t_{\text{нов}} - t_{\text{новім}})S; \quad \alpha = \text{Nu} \frac{\lambda}{l};$$

$$Re = \frac{V l}{\nu}; \quad S = 2lh;$$

$$Nu = \begin{cases} 0,67 Re^{\frac{1}{2}} Pr^{\frac{1}{3}}, & Re < 5 \cdot 10^3; \\ 0,032 Re^{0,8}, & Re > 5 \cdot 10^5. \end{cases}$$

2.49. Фізичні величини середовища, в якому знаходиться теплообмінна секція діаметром d (прийняти $d = 0,25$ м): $\nu_m = 13,1 \cdot 10^{-6} \frac{m^2}{c}$; $\lambda_m = 1,96 \cdot 10^{-2} \frac{Вт}{мК}$; $Pr = 0,71$; $g = 9,81 \frac{м}{c^2}$. Температура, відповідно, секції та навколишнього середовища: $t_c = 120$ °С; $t_m = 18$ °С.

Визначити величину теплового потоку Q з поверхні циліндричної секції в оточуюче середовище (та супутні величини). Формули:

$$Q = \alpha(t_c - t_m) \pi d l;$$

$$Nu = C(GrPr)^n;$$

$$\alpha = Nu \frac{\lambda_m}{d}; \quad \beta = \frac{1}{273 + t_m};$$

$$GrPr = \frac{g d^3 \beta (t_c - t_m)}{\nu_m^2} Pr;$$

$$\begin{cases} C = 0,71, \quad n = 0,24, & 1 \cdot 10^3 \leq (GrPr) \leq 1,2 \cdot 10^9; \\ C = 0,18, \quad n = 0,35, & (GrPr) > 6,1 \cdot 10^{10}. \end{cases}$$

2.50. Знайти коефіцієнт тепловіддачі α , $\frac{Вт}{м^2 \cdot К}$, від горизонтального трубопроводу до повітря та супутні величини, якщо його діаметр $d = 5,5 \cdot 10^{-2}$ м, температура стінки трубопроводу $t_1 = 106$ °С, а температура середовища встановилася на рівні $t_{сер} = 22$ °С. Відомі теплофізичні властивості повітря: $\nu = 1,95 \cdot 10^{-5} \frac{м^2}{c}$, $\lambda = 2,97 \cdot 10^{-2} \frac{Вт}{м \cdot К}$, $\beta = 2,9 \cdot 10^{-3} 1/К$. Задано прискорення вільного падіння $g = 9,81$ м/с². Формули для розрахунку:

$$\alpha = Nu \frac{\lambda}{d} ; \quad \Delta t = t_1 - t_{\text{сер}} ;$$

$$Gr = \frac{g \cdot d^3}{\nu^2} \cdot \beta \cdot \Delta t$$

$$Nu = \begin{cases} 0,54 \cdot (Gr \cdot Pr)^{\frac{1}{4}}, & 4,5 \cdot 10^2 \leq (Gr \cdot Pr) < 2 \cdot 10^7; \\ 0,135 (Gr \cdot Pr)^{\frac{1}{3}}, & 2 \cdot 10^7 \leq (Gr \cdot Pr) \leq 1 \cdot 10^{13}. \end{cases}$$

Прийняти: $P_r = 0,67$.

ТЕМА 3. РОБОТА З ЕЛЕКТРОННИМИ ТАБЛИЦЯМИ. БУДУВАННЯ ДІАГРАМ

Засобами *Excel* обчислити залежності $y = f(x)$ та $q = q(x)$ (дивись завдання). Побудувати діаграму для отриманих функцій. Дані, що розраховані, зберегти також як «текстовий файл *MSDOS*». Експортувати дані текстового файлу до *Excel* за допомогою Майстра експортування. Проаналізувати результати та відмітити область визначення функцій. Сформулювати висновки.

Завдання за варіантами

$$3.1. y = 26.8N \frac{\sin(x - 2\pi/3)}{cqk^c} + 3, \quad x = 0 \dots 2\pi, \quad N = 18.2, \quad k = 1,6, \quad c = 3$$

$$q = \begin{cases} q = 16, & \text{при } x = 0 \dots \pi \quad 0 \leq x < \pi \\ q = 2 \cos x & \text{при } x = \pi \dots 2\pi \quad \pi \leq x \leq 2\pi \end{cases}$$

$$3.2. y = \frac{\sin(x - 2\pi/3) - 0,16c}{q^k G} + 1 \quad x = 0 \dots 2\pi, \quad k = 2, \quad G = 2\pi, \quad c = 1,2$$

$$q = \begin{cases} 0,138c - 12, & \text{при } x = 0 \dots 2, \quad 0 \leq x < 2 \\ 12,1k - 4, & \text{при } x = 2 \dots \pi, \quad 2 \leq x \leq 2\pi \end{cases}$$

$$3.3. \quad y = \frac{2,16 \cos(x - 2\pi/3) - 32,1c}{25qG^c} + 4 \quad x = 0 \dots 2\pi, c = 0,12, G = 124$$

$$q = \begin{cases} 12,65c - 0,143 \text{ npu } x = 0 \dots 1, 0 \leq x < 1 \\ 0,36G + 18,1 \text{ npu } x = 1 \dots 2\pi, 1 \leq x \leq 2\pi \end{cases}$$

$$3.4. \quad y = \frac{\sqrt{G 2\pi/3} + \sin(x - 2\pi/3)}{12,6qG^c} + 12,2, x = 0 \dots 2\pi, G = 118,1, c = 0,33$$

$$q = \begin{cases} c + 1,1, & 0 \leq x < 1,1 \\ q = 0,625 + 14,2\pi c, & 1,1 \leq x \leq 2\pi \end{cases}$$

$$3.5. \quad y = \frac{615 \sqrt{G - \sin(x - 2\pi/3)}}{16,2qc(G - 3)} + 12, x = 0 \dots 2\pi, G = 76,2, c = 11$$

$$q = \begin{cases} q = \cos(x), & 0 \leq x < \pi/2 \\ q = 2 \cos(x), & \pi/2 \leq x \leq 2\pi \end{cases}$$

$$3.6. \quad y = 18,7 \frac{tg(x)}{13,5cG^c q} - 2, \quad x = 0 \dots \pi/4, \quad c = 0,3, \quad G = 18$$

$$q = \begin{cases} q = 16, & \text{ npu } x = 0 \dots \pi/16 \\ q = 2 \cos(x) \text{ npu } \pi/16 < x \leq \pi/4 \end{cases}$$

$$3.7. \quad y = tg(x) + \frac{18,7 \sin(x - 2\pi/3)}{qcG}, x = 0 \dots \pi/6, G = 11,1, c = 17,3$$

$$q = \begin{cases} q = 16,2 \text{ npu } x = 0 \dots \pi/16 \\ q = \cos(x) \text{ npu } \pi/16 < x \leq \pi/6 \end{cases}$$

$$3.8. \quad y = \frac{\sin(x - 2\pi/3)}{q^k G} - 0,16c, x = 0 \dots 2\pi, k = 0,25, G = 2\pi, c = 95$$

$$q = \begin{cases} 0,138c - 12, & 0 \leq x < 2 \\ 12,1k + 4, & 2 \leq x \leq 2\pi \end{cases}$$

$$3.9. \quad y = \frac{2,16 \cos(x - 2\pi/3)}{25qG^c} + 32,1c, x = 0 \dots 2\pi, c = 0,12, G = 124$$

$$q = \begin{cases} 6.2c - 12, 0 \leq x < 1.1 \\ 0.36G + 18.1, 1.1 \leq x \leq 2\pi \end{cases}$$

$$3.10. \ y = \frac{\sqrt{G - \sin(x - 2\pi/3)}}{qc(G - 3)} + 6.12 * q, x = 0 \dots 2\pi, g = 76.1, c = 10$$

$$q = \begin{cases} q = \cos(x), 0 \leq x < \pi/2 \\ q = 2, \pi/2 \leq x \leq 2\pi \end{cases}$$

$$3.11. \ y = 28.2k \frac{\sin(x - 2\pi/3)}{6qk^c} + 12, k = 18.2, c = 3, x = 0 \dots 2\pi$$

$$q = \begin{cases} 0.138c - 12, 0 \leq x < \pi \\ 12.1k - 4, \pi \leq x \leq 2\pi \end{cases}$$

$$3.12. \ y = 18.6 \sin(x - 2\pi/3) + \frac{k}{6qk^c}, k = 18.2, c = 3, x = 0 \dots 2\pi$$

$$q = \begin{cases} 0.2c - 6, 0 \leq x < \pi \\ 11k - 4.2, \pi \leq x \leq 2\pi \end{cases}$$

$$3.13. \ y = \frac{2.16 \cos(x - 2\pi/3)}{25q} - \frac{3.12c}{G^c}, c = 0.12, G = 124, x = 0 \dots 2\pi$$

$$q = \begin{cases} 6.54c - 0.143, 0 \leq x < 1 \\ 0.25G - 16, 1 \leq x \leq 2\pi \end{cases}$$

$$3.14. \ y = \frac{\sqrt{G2\pi/3} + \cos(x - 2\pi/3)}{12.2qG^c} + 12.1, x = 0 \dots 2\pi, G = 118.1, c = 0.33$$

$$q = \begin{cases} q = c + 2, 0 \leq x < \pi \\ q = 0.6 + 14.3\pi c, \pi \leq x \leq 2\pi \end{cases}$$

$$3.15. \ y = \frac{\sqrt{G - \cos(x - 2\pi/3)}}{16.2qc(G - 3)} + 11.7, x = 0 \dots 2\pi, G = 76.2, c = 11$$

$$q = \begin{cases} q = \cos(x), 0 \leq x < \pi \\ q = 2 \cos(x), \pi \leq x \leq 2\pi \end{cases}$$

$$3.16. y = \frac{2.16 \sin(x - 2\pi/3) - 32.1c}{25qG^c} + 4, x = 0 \dots 2\pi, c = 0.12, G = 124$$

$$q = \begin{cases} 12.65c - 0.143, 0 \leq x < 1 \\ 0.3G + 12.1, 1 \leq x \leq 2\pi \end{cases}$$

$$3.17. y = \frac{\sqrt{G\pi} + \cos(x - 2\pi/3)}{15.6qG^{2c}} + 13.2, x = 0 \dots 2\pi, G = 121, c = 0.25$$

$$q = \begin{cases} q = c + 1.12, 0 \leq x \leq \pi \\ q = 0.27 + 12.7\pi c, \pi < x \leq 2\pi \end{cases}$$

$$3.18. y = \operatorname{tg}(x) + \frac{\sin(x - 2\pi/3)}{qc} + G13.2, x = 0 \dots \pi/4, G = 11.1, c = 17.3$$

$$q = \begin{cases} q = 18.1 & \text{npu } x = 0 \dots \pi/6 \\ q = \cos(x) & \text{npu } \pi/6 < x \leq \pi/4 \end{cases}$$

$$3.19. y = \operatorname{arctg}(x) + \frac{\sqrt{30G - 6.2}}{qc}, x = 0 \dots 1, G = 1.6, c = 12$$

$$q = \begin{cases} q = \cos(x), x = 0 \dots 0.5 \\ q = \sin(x), 0.5 < x \leq 1 \end{cases}$$

$$3.20. y = \lg G + \frac{\operatorname{tg}(x)}{qc}, x = 0 \dots 2\pi/7, G = 18.7, c = 12$$

$$q = \begin{cases} q = 16c, x = 0 \dots 2\pi/6 \\ q = -16c, 2\pi/6 < x \leq 2\pi/7 \end{cases}$$

$$3.21. y = \frac{18.7 \operatorname{tg}(x)}{13.5cqG} - 12.7, x = 0 \dots \pi/4, c = 0.3, G = 18.7$$

$$q = \begin{cases} q = \sqrt{52G}, x = 0 \dots \pi/16 \\ q = \sin(x), \pi/16 < x \leq \pi/4 \end{cases}$$

$$3.22. y = \frac{\sin(\pi x - 3)}{G18.1q} - \sqrt{12G + k}, k = 16.7, G = 1.13, x = 0 \dots \pi$$

$$q = \begin{cases} q = 25 \cos(x) & x = 0 \dots \pi / 2 \\ q = 0.13 \sqrt{k+11}, & \pi / 2 < x \leq \pi \end{cases}$$

$$3.23. y = 26.8N \frac{\sin(\pi - 2\pi/3)}{cqk^c} + 3, \quad x = 0 \dots 2\pi, \quad N=18.2, \quad k=1,6, \quad c=3$$

$$q = \begin{cases} q = 16, & npu \quad x = 0 \dots \pi \quad 0 \leq x < \pi \\ q = 2 \cos x & npu \quad x = \pi \dots 2\pi \quad \pi \leq x \leq 2\pi \end{cases}$$

$$3.24. y = \frac{\sin(x - 2\pi/3) - 0.16c}{q^k G} + 1 \quad x = 0 \dots 2\pi, \quad k = 2, \quad G = 2\pi, \quad c = 1,2$$

$$q = \begin{cases} 0.138c - 12, & npu \quad x = 0 \dots 2, \quad 0 \leq x < 2 \\ 12.1k - 4, & npu \quad x = 2 \dots \pi, \quad 2 \leq x \leq 2\pi \end{cases}$$

$$3.25. y = \frac{2.16 \cos(x - 2\pi/3) - 32.1c}{25qG^c} + 4 \quad x = 0 \dots 2\pi, \quad c = 0.12, \quad G = 124$$

$$q = \begin{cases} 12.65c - 0.143 npu \quad x = 0 \dots 1, \quad 0 \leq x < 1 \\ 0.36G + 18.1 npu \quad x = 1 \dots 2\pi, \quad 1 \leq x \leq 2\pi \end{cases}$$

$$3.26. y = \frac{\sqrt{2\pi G/3} + \sin(0.8x)}{12.6qG^c} + 12.2, \quad x = 0 \dots 2\pi, \quad G = 118.1, \quad c = 0.33$$

$$q = \begin{cases} c + 1.1, & 0 \leq x < 1.1 \\ q = 0.625 + 14.2\pi c, & 1.1 \leq x \leq 2\pi \end{cases}$$

$$3.27. y = \frac{615\sqrt{G - 12\sin(2.2x)}}{16.2qc(G-3)} + 12, \quad x = 0 \dots 2\pi, \quad G = 76.2, \quad c = 11$$

$$q = \begin{cases} q = \cos(x), & 0 \leq x < \pi / 2 \\ q = 2 \cos(x), & \pi / 2 \leq x \leq 2\pi \end{cases}$$

$$3.28. y = 18.7 \frac{tg(x)}{13.5 * c * G^c * q} - 2, \quad x = 0 \dots \pi / 4, \quad c = 0.3, \quad G = 18$$

$$q = \begin{cases} q = 16, & npu \quad x = 0 \dots \pi / 16 \\ q = 2 \cos(x) npu \quad \pi / 16 < x \leq \pi / 4 \end{cases}$$

$$3.29. \quad y = \operatorname{tg}(x) + \frac{18.7 \sin(x - 2\pi/3)}{q * c * G}, \quad x = 0 \dots 2\pi, \quad G = 11.1, \quad c = 17.3$$

$$q = \begin{cases} q = 16.2 \operatorname{npu} x = 0 \dots \pi/16 \\ q = \cos(x) \operatorname{npu} \pi/16 \prec x \leq \pi/4 \end{cases}$$

$$3.30. \quad y = \frac{\sin(x - 2\pi/3)}{q^k G} - 0.16c, \quad x = 0 \dots 2\pi, \quad k = 0.25, \quad G = 2\pi, \quad c = 95$$

$$q = \begin{cases} 0.138c - 12, & 0 \leq x \prec 2 \\ 12.1k + 4, & 2 \leq x \leq 2\pi \end{cases}$$

$$3.31. \quad y = \frac{2.16 \cos(x - 2\pi/3)}{25qG^c} + 32.1c, \quad x = 0 \dots 2\pi, \quad c = 0.12, \quad G = 124$$

$$q = \begin{cases} 6.2c - 12, & 0 \leq x \prec 1.1 \\ 0.36G + 18.1, & 1.1 \leq x \leq 2\pi \end{cases}$$

$$3.32. \quad y = \frac{\sqrt{G - \sin(x - 2\pi/3)}}{qc(G - 3)} + 6.12q, \quad x = 0 \dots 2\pi, \quad g = 76.1, \quad c = 10$$

$$q = \begin{cases} q = \cos(x), & 0 \leq x \prec \pi/2 \\ q = 2, & \pi/2 \leq x \leq 2\pi \end{cases}$$

$$3.33. \quad y = 18.6 \sin(x - 2\pi/3) + \frac{k}{6qk^c}, \quad k = 18.2, \quad c = 3, \quad x = 0 \dots 2\pi$$

$$q = \begin{cases} 0.2c - 6, & 0 \leq x \prec \pi \\ 11k - 4.2, & \pi \leq x \leq 2\pi \end{cases}$$

$$3.34. \quad y = \frac{2.16 \cos(x - 2\pi/3)}{25q} - \frac{3.12c}{G^c}, \quad c = 0.12, \quad G = 124, \quad x = 0 \dots 2\pi$$

$$q = \begin{cases} 6.54c - 0.143, & 0 \leq x \prec 1 \\ 0.25G - 16, & 1 \leq x \leq 2\pi \end{cases}$$

$$3.35. \quad y = \frac{\sqrt{G2\pi/3} + \cos(x - 2\pi/3)}{12.2qG^c} + 12.1, \quad x = 0 \dots 2\pi, \quad G = 118.1, \quad c = 0.33$$

$$q = \begin{cases} q = c + 2, 0 \leq x < \pi \\ q = 0.6 + 14.3\pi c, \pi \leq x \leq 2\pi \end{cases}$$

$$3.36. \ y = \frac{\sqrt{G - \cos(x - 2\pi/3)}}{16.2qc(G-3)} + 11.7, x = 0 \dots 2\pi, G = 76.2, c = 11$$

$$q = \begin{cases} q = \cos(x), 0 \leq x < \pi \\ q = 2 \cos(x), \pi \leq x \leq 2\pi \end{cases}$$

$$3.37. \ y = \frac{2.16 \sin(x - 2\pi/3) - 32.1c}{25qG^c} + 4, x = 0 \dots 2\pi, c = 0.12, G = 124$$

$$q = \begin{cases} 12.65c - 0.143, 0 \leq x < 1 \\ 0.3G + 12.1, 1 \leq x \leq 2\pi \end{cases}$$

$$3.38. \ y = \frac{\sqrt{G\pi} + \cos(x - 2\pi/3)}{15.6qG^{2c}} + 13.2, x = 0 \dots 2\pi, G = 121, c = 0.25$$

$$q = \begin{cases} q = c + 1.12, 0 \leq x \leq \pi \\ q = 0.27 + 12.7\pi c, \pi < x \leq 2\pi \end{cases}$$

$$3.39. \ y = 28.2k \frac{\sin(x - 2\pi/3)}{6qk^c} + 12, k = 18.2, c = 3, x = 0 \dots 2\pi$$

$$q = \begin{cases} q = 18.1 & \text{npu } x = 0 \dots \pi/6 \\ q = \cos(x) & \text{npu } \pi/6 < x \leq \pi/4 \end{cases}$$

$$3.40. \ y = \arctg(x) + \frac{\sqrt{30G - 6.2}}{qc}, x = 0 \dots 1, G = 1.6, c = 12$$

$$q = \begin{cases} q = \cos(x), x = 0 \dots 0.5 \\ q = \sin(x), 0.5 < x \leq 1 \end{cases}$$

$$3.41. \ y = \lg G + \frac{\lg(x)}{qc}, x = 0 \dots 2\pi/13, G = 18.7, c = 12$$

$$q = \begin{cases} q = 16c, x = 0 \dots 2\pi/6 \\ q = -16c, 2\pi/6 < x \leq 2\pi/13 \end{cases}$$

$$3.42. y = \frac{18.7 \operatorname{tg}(x)}{13.5cqG} - 12.7, x = 0 \dots \pi/4, c = 0.3, G = 18.7$$

$$q = \begin{cases} q = \sqrt{52G}, & x = 0 \dots \pi/16 \\ q = \sin(x), & \pi/16 \prec x \leq \pi/4 \end{cases}$$

$$3.43. y = \frac{\sin(\pi x - 3)}{G18.1q} - \sqrt{12G + k}, k = 16.7, G = 1.13, x = 0 \dots \pi$$

$$q = \begin{cases} q = 25 \cos(x) & x = 0 \dots \pi/2 \\ q = 0.13\sqrt{k+11}, & \pi/2 \prec x \leq \pi \end{cases}$$

$$3.44. y = \frac{2.16 \sin(x - 2\pi/3) - 32.1c}{25qG^c} + 4, x = 0 \dots 2\pi, c = 0.12, G = 124$$

$$q = \begin{cases} 12.65c - 0.143, & 0 \leq x \prec 2 \\ 0.3G + 12.1, & 1 \leq x \leq 2\pi \end{cases}$$

$$3.45. y = \frac{\sin(x-3)}{G1.1q} - \sqrt{4G + 0.6k}, k = 16.7, G = 1.13, x = 0 \dots \pi$$

$$q = \begin{cases} q = 22 \cos(x) & x = 0 \dots \pi/2 \\ q = 0.1\sqrt{k+11}, & \pi/2 \prec x \leq \pi \end{cases}$$

$$3.46. y = \frac{\sqrt{18c} + \sin(0.4 + x)}{11qG^c} + 12.2, x = 0 \dots 2\pi, G = 118.1, c = 0.33$$

$$q = \begin{cases} c + 1.11, & 0 \leq x \prec 1.1 \\ q = 0.25 + 1.2\pi c, & 1.1 \leq x \leq 2\pi \end{cases}$$

$$3.47. y = \operatorname{tg}(0.6x) + \frac{\sin(x - \pi/3)}{qc} + G13.2, x = 0 \dots \pi/4, G = 11.1, c = 17.3$$

$$q = \begin{cases} q = 12.1 & \text{npu } x = 0 \dots \pi/6 \\ q = \cos(6x) & \text{npu } \pi/6 \prec x \leq \pi/4 \end{cases}$$

$$3.48. y = 19.2c \frac{\sin(x - 2.2\pi/3)}{4qk^c} + 12, k = 18.2, c = 2, x = 0 \dots 2\pi$$

$$q = \begin{cases} 0.18c - 12, & 0 \leq x < \pi \\ 11.1k - 2, & \pi \leq x \leq 2\pi \end{cases}$$

$$3.49. \quad y = \frac{25\sqrt{G - \sin(2x)}}{13.2qc(0.22G - 3)} + 12, \quad x = 0 \dots 2\pi, \quad G = 76.2, \quad c = 11$$

$$q = \begin{cases} q = 2 \cos(x), & 0 \leq x < \pi/2 \\ q = \cos(x), & \pi/2 \leq x \leq 2\pi \end{cases}$$

$$3.50. \quad y = \frac{\sin(x - 2\pi/3) - 0.1c}{G^k c} + 1 \quad x = 0 \dots 2\pi, \quad k = 2, \quad G = 2\pi, \quad c = 1.2$$

$$q = \begin{cases} 0.148c - 10.2, \text{ при } x = 0.2, & 0 \leq x < 2 \\ 11.1k - 3.4, \text{ при } x = 2 \dots \pi, & 2 \leq x \leq 2\pi \end{cases}$$

$$3.51. \quad y = 28.2k \frac{\sin(x - 2\pi/3)}{6qk^c} + 12, \quad k = 18.2, \quad c = 3, \quad x = 0 \dots 2\pi$$

$$q = \begin{cases} 0.138c - 12, & 0 \leq x < \pi \\ 12.1k - 4, & \pi \leq x \leq 2\pi \end{cases}$$

ТЕМА 4. ЦИКЛІЧНІ ОБЧИСЛЮВАЛЬНІ ПРОЦЕСИ

4.1. Для пластини $l = 1,8$ м в турбулентному повздовжньому потоці повітря $V = 78$ м/с визначити значення місцевого коефіцієнта тепловіддачі α і товщину прикордонного слою δ : а) для координат x від 0,01 м до 1,7 м з кроком 0,01 м; б) для координат x , що приймають значення: 0,03; 0,06; 0,09; 0,12; 0,15; 0,2; 0,25; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 1,0. Фізичні константи: $\nu = 14,2 \cdot 10^{-6} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$, $\lambda = 2,5 \cdot 10^{-2} \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$.

Формули:

$$\delta = 0.37 \cdot x \cdot \text{Re}^{-0.2};$$

$$\text{Nu} = 2.55 \cdot 10^{-2} \text{Re}^{0.8};$$

$$\alpha = \text{Nu} \cdot \frac{\lambda}{x}; \quad \text{Re} = \frac{IV}{\nu}.$$

4.2. Визначити напруження σ_r і σ_t та переміщення u у товстостінному циліндрі з радіусами $r_1 = 0,12$ м, $r_2 = 0,28$ м під дією внутрішнього $p_1 = 180$ МПа та зовнішнього $p_2 = 12$ МПа тиску. Модуль пружності та коефіцієнт Пуассона: $E = 2,1 \cdot 10^5$ МПа, $\mu = 0,3$. Розрахункові формули:

$$\sigma_r = \frac{r_1^2 \cdot p_1 - r_2^2 \cdot p_2}{r_2^2 - r_1^2} - \frac{(p_1 - p_2) \cdot r_1^2 \cdot r_2^2}{R^2 \cdot (r_2^2 - r_1^2)};$$

$$\sigma_t = \frac{r_1^2 \cdot p_1 - r_2^2 \cdot p_2}{r_2^2 + r_1^2} + \frac{(p_1 - p_2) \cdot r_1^2 \cdot r_2^2}{R^2 \cdot (r_2^2 - r_1^2)};$$

$$u = \frac{1 - \mu}{E} \cdot \frac{r_1^2 \cdot p_1 - r_2^2 \cdot p_2}{r_2^2 - r_1^2} + \frac{1 + \mu}{E} \cdot \frac{(p_1 - p_2) \cdot r_1^2 \cdot r_2^2}{R^2 \cdot (r_2^2 - r_1^2)}.$$

Роздрукувати σ_t , σ_r , u , R з кроком по радіусу $\Delta R = \begin{cases} 0,01 \text{ якщо } r < R < 0,2; \\ 0,02 \text{ якщо } 0,2 \leq R \leq r_2. \end{cases}$

Визначити окремо σ_t , σ_r , u , при $R = 0,133; 0,1387; 0,1432; 0,177; 0,181; 0,203; 0,234; 0,236$.

4.3. Термокамера має піношамотні стінки, товщиною $\delta = 0,35$ м. Температура внутрішньої поверхні стінок $t_{c1} = 1000$ °С, зовнішньої – $t_{c2} = 60$ °С. Теплопровідність $\lambda_0 = 0,92 \frac{\text{Вт}}{\text{М} \cdot \text{К}}$. Визначити температуру T^* стінки, перепад температур ΔT та супутні величини: а) на глибині $x = 0; 0,05; 0,1; 0,13; 0,15; 0,18; 0,2; 0,3; 0,31$ м; б) на глибині x від 0,1 м до 0,35 м з кроком 0,002 м. Формули:

$$T = 273 + \sqrt{\left(\frac{1}{\beta} + t_{c1}\right)^2 - \frac{2 \cdot g x}{\lambda_0 \cdot \beta}} - \frac{1}{\beta};$$

$$g = \frac{\lambda}{\delta} \cdot (t_{c1} - t_{c2});$$

$$\lambda = \lambda_0 \left(1 + \beta \cdot \frac{t_{c1} + t_{c2}}{2} \right);$$

$$T^* = 273 + t_{c1} - \frac{t_{c1} - t_{c2}}{\delta} \cdot x;$$

$$\beta = \frac{1}{273 + t_{c1}}; \Delta T = T - T^*.$$

4.4. Перегородка трубопроводу радіусом $a = 0,36$ м та товщиною $k = 0,03$ м знаходяться під дією тиску ацетилену $p = 0,28$ МПа. Визначити напруження δ_r , δ_τ , а також прогин перегородки W , якщо вона зроблена з сталі (модуль пружності $E = 2,1 \cdot 10^5$ МПа; коефіцієнт Пуассона $\mu = 0,31$) з кроком по радіусу $\Delta r = 0,005$, а також в точках: $r = 0; 0,008; 0,01; 0,012; 0,018; 0,022; 0,028; 0,29$ м. Формули:

$$\delta_r = \frac{6 \cdot p}{16 \cdot k^2} \cdot [a^2(1 + \mu) - r^2(3 + \mu)];$$

$$\delta_\tau = \frac{6 \cdot p}{16 \cdot k^2} \cdot [a^2(1 + \mu) - r^2(1 + 3\mu)];$$

$$W = \frac{p}{64R} (a^2 - r^2)^3;$$

$$R = \frac{Ek^3}{12(1 - \mu)}.$$

4.5. З резервуару, з температурою $T_0 = 380$ К та під тиском $P_0 = 5$ МПа, через конфузorne сопло витікає кисень у середовище з тиском $P = 1 \dots 4,8$ МПа. Коефіцієнт адіабати $K = 1,4$; $R = 8314 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$; $\mu = 32$. Визначити швидкість витікання кисню V в залежності від тиску P з кроком $0,5$ МПа, а також при дії тиску $P = 1,1; 1,3; 1,8; 2,1; 2,73; 3,8; 4,6; 4,7$ МПа. Формула:

$$V = \sqrt{2 \cdot \frac{k}{k-1} \cdot \frac{R}{\mu} \cdot T_0 \cdot \left[1 - \left(\frac{P}{P_0} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]}.$$

4.6. Піч, що обертається, має стінку товщиною $\delta = 0,2$ м та теплопровідністю $\lambda = 4,2 \frac{\text{Вт}}{\text{м К}}$. Температура в печі $t_g = 1300$ °С, ззовні $t_n = 28$ °С.

Коефіцієнт тепловіддачі в навколишнє середовище $\alpha_n = 32 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{К}}$, у середині печі

$\alpha_g = 200; 300; 400; 600; 800; 1100; 1200; 1250; 1300; 1400; 1600; 2000; 3000; 4000 \frac{\text{Вт}}{\text{м К}}$.

Визначити залежність температури стінки всередині та зовні, тепловий потік тощо від коефіцієнта α_g . Формули:

$$t_1 = t_g - \frac{q}{\alpha_g};$$

$$t_2 = t_n + \frac{q}{\alpha_n};$$

$$q = \frac{t_g - t_n}{\frac{1}{\alpha_g} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_n}}.$$

Розрахувати шукані величини також за умови $\alpha_g = 600 \frac{\text{Вт}}{\text{м К}}$, для значень

$\delta = 0,02 \dots 0,4$ м з кроком 0,02 м.

4.7. Футерівка камери для сушіння клінкеру складається з шарів шамотної ($\delta_1 = 0,15$ м; $\lambda_1 = 0,95 \frac{\text{Вт}}{\text{м К}}$) та червоної ($\delta_2 = 0,25$ м; $\lambda_2 = 3,35 \frac{\text{Вт}}{\text{м К}}$) цегли. Температура у камері $t_g = 950$ °С, ззовні — $t_{\text{сеп.}} = 20$ °С. Визначити температури t_1 , t_2 , t_3 на поверхні стінки камери та між шарами в залежності від коефіцієнта тепловіддачі

$\alpha_c = 300; 350; 400; 450; 520; 535; 600; 670; 700; 720; 790; 810; 830; 870; 900 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{К}}$. Врахувати

$\alpha_c = 320 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{К}}$. Розрахувати також залежність $q = f(\alpha_c)$, $\alpha_c = 300 \dots 900 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{К}}$ з кроком

$50 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{К}}$. Формули:

$$t_1 = t_B - \frac{q}{\alpha_c};$$

$$t_2 = t_1 - q \frac{\delta_1}{\lambda_1};$$

$$t_3 = t_{\text{сеп}} + q \frac{\delta_2}{\lambda_2};$$

$$q = \frac{t_c - t_{\text{сеп.}}}{\frac{1}{\alpha_c} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{1}{\alpha_c}}.$$

4.8. Пластина має довжину $l = 3$ м та знаходиться в потоці рідини. Визначити залежність товщини гідродинамічного шару рідини δ на відстані $x = 0,1; 0,25; 0,28; 0,3; 0,36; 0,39; 0,41; 0,5; 0,6; 0,7; 0,81; 0,9; 0,95; 1,0; 1,3; 1,7; 1,9$ м, якщо

$\nu = 3,2 \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$; $t_0 = 22^\circ\text{C}$; $\nu = 15,06 \cdot 10^{-6} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$; $Pe = 0,703$ – параметри рідини в потоці, а

$\lambda = 2,6 \cdot 10^{-2} \frac{\text{Вт}}{\text{м К}}$. Також визначити залежність коефіцієнта тепловіддачі α від

координати x , за умови $x = 0,5 \dots l$ м з кроком 10 см. Формули:

$$\delta = \frac{4,64x}{\sqrt{\text{Re}}};$$

$$\text{Re} = \frac{ux}{\nu};$$

$$\alpha = \mu_u \frac{\lambda}{x};$$

$$\mu_u = 0,335 \text{Re}^{\frac{1}{2}} \cdot \text{Pe}^{\frac{1}{3}}.$$

4.9. Подвійна термостінка виготовлена з магнєзітохромїта ($\lambda_1 = 4,3 \frac{\text{Вт}}{\text{м К}}$)

товщиною δ_1 та шамотної лещадкі ($\lambda_2 = 0,75 \frac{\text{Вт}}{\text{м К}}$) товщиною $\delta = 0,06$ м.

Температура однієї з сторїн стїнки $t_{\text{гор}} = 1400$ °С, другої – $t_{\text{хол}} = 22$ °С. Коефіцієнти

тепловіддачі від стїнки $\alpha_2 = 31$ Вт/(м К). Тепловий потїк крізь стїнку $\theta = 1000 \frac{\text{Вт}}{\text{м К}}$

. Визначити температуру поверхонь стїнок t_1, t_2, t_3 в залежності від товщини

слою: $\delta_1 = 0,3; 0,28; 0,25; 0,22; 0,2; 0,18; 0,15; 0,13; 0,11; 0,1; 0,08; 0,07; 0,06$ м. Окремо

визначити коефіцієнт α_1 , якщо $\delta = 0,3 \dots 0,05$ м з кроком 0,05 м. Формули:

$$\alpha_1 = \frac{1}{\beta};$$

$$t_1 = t_{\text{гор}} - \frac{\theta}{\alpha_1};$$

$$t_3 = t_2 - \theta \frac{\lambda_2}{\delta_2};$$

$$t_2 = t_1 - \theta \frac{\lambda_1}{\delta_1};$$

$$\beta = \frac{t_{\text{гор}} - t_{\text{хол}}}{\theta} - \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{1}{\alpha_2}.$$

4.10. По трубопроводу рухається вода зі швидкістю $g = 0,28$ м/с.

Температура стїнок трубопроводу $t_c = 62$ °С. Довжина трубопроводу $l = 2,2$ м.

Температура води на вході $t_{\text{вх}} = 12$ °С, на виході $t_{\text{вих}} = 30$ °С. Визначити

коефіцієнт тепловіддачі α , якщо діаметр трубопроводу $d = 0,003; 0,006; 0,009;$

$0,01; 0,012; 0,015; 0,018; 0,021; 0,025; 0,03$ м, а також окремо величину теплового

потіку Q в залежності від діаметру d , якщо діапазон його зміни складає від 0,005

м до 0,03 м з кроком 0,0025 м. Фізичні коефіцієнти прийняти: $\nu_{жс} = 1,16 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$;
 $C_p = 4,17 \cdot 10^{-3} \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$; $\lambda_{жс} = 0,63 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$; $\rho_{жс} = 998,6 \text{ кг}/\text{м}^3$; $\mu_{жс} = 1156 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с}$;
 $\mu_c = 550,1 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с}$. Формули:

$$Q = \alpha [t_c - 0,5(t_{вх} + t_{вих})] \pi d l;$$

$$Nu = 1,55 \left(Pe \frac{d}{l} \right)^{1/3} \left(\frac{\mu_{жс}}{\mu_c} \right)^{0,14} \cdot \varepsilon;$$

$$\varepsilon = 0,6 \left(\frac{1}{Re} \frac{l}{d} \right)^{-1/7} \left(1 + 2,5 \frac{1}{Re} \frac{l}{d} \right);$$

$$G = \rho_{жс} g \frac{\pi d^2}{4}; \quad Re = \frac{gd}{\nu_{жс}};$$

$$\alpha = Nu \frac{\lambda_{жс}}{d}; \quad Pe \frac{d}{l} = \frac{4G C_p}{\pi l \lambda_{жс}}.$$

4.11. Компресор стискає газ від $P_1 = 2,56 \text{ кг}/\text{см}^2$ до $P_2 = 17 \text{ кг}/\text{см}^2$. Початкова температура газу $t_1 = 8^\circ \text{C}$; КПД компресора $\eta = 0,72$. Теплофізичні константи: $k = 1,3$; $R = 489,2 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$; $\gamma = 0,761 \text{ кг}/\text{м}^3$. Визначити потужність N , Вт, що споживається компресором у залежності від об'єму газу V , при його зміні від 100 до 500 $\text{м}^3/\text{год}$ з кроком 10 $\text{м}^3/\text{год}$, а також теоретичну роботу L , Дж/кг, для значень $V = 112; 136; 152; 164; 183; 194; 202; 302; 430; 470; 493 \text{ м}^3/\text{год}$. Формули:

$$N = \frac{GL}{3600\eta 10^3}; \quad G = V\gamma;$$

$$L = \frac{k}{k-1} R t_1 \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right].$$

4.12. Теплоізоляція стінки печі виконана з волокнистого матеріалу товщиною $\delta_2 = 0,11 \text{ м}$, а саме стінка – з вогнетриву товщиною $\delta_1 = 0,2 \text{ м}$. Температура термоізоляції усередині печі $T_{гор} = (1400 + 273) \text{ К}$, навколишнього

середовища ззовні печі $T_{o.c} = (28 + 273) \text{ K}$, коефіцієнт тепловіддачі у навколишнє середовище $\alpha = 48 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$. Визначити величину теплового потоку для двох випадків:

а) при наявності термоізоляції за формулою:

$$q = \frac{T_1 - T_{o.c.}}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{1}{\alpha}},$$

якщо коефіцієнти теплопровідності $\lambda_1 = 5 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$; $\lambda_2 = (0,02 \dots 0,5) \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$, з кроком $0,2 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$.

б) у відсутності термоізоляції за формулою:

$$q = \frac{T_1 - T_{o.c.}}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{1}{\alpha}},$$

якщо коефіцієнт теплопровідності $\lambda_1 = (20; 18; 10; 7; 5; 3; 1,6; 1,1; 0,6) \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$.

Також визначити температуру на зовнішній поверхні стінки $T_{хол}$ і температуру на границі вогнетрив-термоізоляція $T_{гран.}$ за умов варіанта а).
Формули:

$$T_{гран.} = T_{гор.} - q \frac{\delta_1}{\lambda_1}; \quad T_{хол.} = T_{o.c.} + \frac{q}{\alpha}.$$

4.13. У кристалізаторі безперервної дії відбувається кристалізація водного розчину NaNO_3 . Визначити величину теплового потоку q (та супутні величини), який відводиться з теплообмінної поверхні площею $S = 1,3 \text{ м}^2$ при охолодженні розчину від $t_1 = 93 \text{ }^\circ\text{C}$ до $t_2 = 41 \text{ }^\circ\text{C}$, який вміщує $m_1 = 16,2$ моль NaNO_3 на $V = 1000$ г води, з урахуванням випаровування $k = 4\%$ вихідної кількості

розчину. Концентрація насиченого розчину при 41°C складає $m_2 = 12,6$ моль на $V = 1000$ г води. Маса NaNO_3 $\mu = 8,52$ кг/моль; питома теплота кристалізації $q_n = 2,11 \cdot 10^5$ Дж/моль; питома теплоємність твердої солі $C_p = 2472$ Дж/(кг·К); питома теплота пароутворення води $r = 2,345 \cdot 10^5$ Дж/кг; $\chi_{\text{пр}} = 1$. Продуктивність кристалізатора по розчину $G = (4200; 4500; 4720; 5000; 5300; 5600; 5900; 6000; 6500; 7000)$ кг/год. Формули:

$$G_{np} = \frac{G(\chi_2 - \chi_1) - W\chi_1}{\chi_2 - \chi_{np}};$$

$$W = Gk \frac{1}{100};$$

$$q = \frac{GC_p}{S}(t_1 - t_2) + G_{np}q_n \frac{1}{S} - \frac{Wr}{S};$$

$$\chi_1 = \frac{m_1\mu}{V + m_1\mu}; \quad \chi_2 = \frac{m_2\mu}{V + m_2\mu}.$$

Протабулювати також залежність кількості кристалів G_{np} від продуктивності G при $G = (4 \cdot 10^3 \dots 7 \cdot 10^3)$ кг/ч з кроком 100 кг/ч.

4.14. У насадочному адсорбері відбувається поглинання двооксиду сірки з інертного газу під атмосферним тиском. Адсорбер наповнений адсорбентом, для якого $G = 48$ м²/м³; $V_{cs} = 0,55$ м³/м³. Визначити коефіцієнт масопередачі β та супутні величини, якщо швидкість проходження газів крізь адсорбер $W = (0,06; 0,1; 0,12; 0,14; 0,17; 0,19; 0,21; 0,24; 0,25)$ м/с. Газова фаза має наступні властивості: $\rho = 1,12$ кг/м³; $\mu = 0,172$ Па·с; $D = 11,47 \cdot 10^{-6}$ м²/с. Формули:

$$\beta = Nu \frac{D}{d}; \quad d = 4V_{cs} \frac{1}{G};$$

$$Nu = 0,407 \text{Re}^{0,655} \text{Pr}^{0,33};$$

$$\text{Pr} = \frac{\mu}{\rho D}; \quad \text{Re} = 4 \frac{W \rho}{G \mu}.$$

Виконати також розрахунки за умови $W = 0,2$ м/с, якщо G змінюється від 40 до $66,5 \text{ м}^2/\text{м}^3$, з кроком $0,1 \text{ м}^2/\text{м}^3$.

4.15. Визначити діаметр ректифікаційної колони D , м, з ковпачковими тарілками, відстань між якими $H = 320$ мм, якщо густина пари $\rho_0 = 1,3 \text{ кг/м}^3$, тиск $p_0 = 1,04 \text{ кг/см}^2$, густина рідини $\rho_p = 420 \text{ кг/м}^3$, абсолютний тиск у колоні складає $p = 1,3 \text{ кг/см}^2$, середня температура $T = 235 \text{ К}$. Крізь колону прокачується $l_0 = 1200; 1300; 1420,8; 1600; 1700; 1820; 1940; 2000; 2150,8; 2300; 2500; 3000; 3400; 3620; 3800 \text{ м}^3/\text{год}$ пари. Розрахувати також залежність $D = f(p)$ при $p = 0,1 \dots 2 \text{ м}^3/\text{год}$ з кроком $0,1 \text{ м}^3/\text{год}$ при $l_0 = 2500 \text{ м}^3/\text{год}$. Формули :

$$\rho_n = \frac{\rho_0 \cdot T_0 \cdot p}{T \cdot p_0};$$

$$V = \frac{l_0 \cdot T \cdot p_0}{T_0 \cdot p \cdot 3600};$$

$$\omega = l \sqrt{\frac{\rho_p}{\rho_0}}; \quad S = \frac{V}{\omega};$$

$$D = \sqrt{\frac{S}{0,785}};$$

$$l = 0,0315; \quad T_0 = 237 \text{ К}.$$

4.16. Надано залежності:

$$G = \frac{V \cdot \tau \cdot l_0}{d_1 - d_2},$$

$$H = \frac{G}{\rho_{\text{нас}} \cdot 0,785 \cdot D^2},$$

$$D = \sqrt{\frac{V}{3600 \cdot 0,785 \cdot \omega}},$$

за якими визначають кількість активного вугілля (кг), висоту його слою (м), і діаметр (м) адсорбера періодичної дії для очищення бензино-повітряної суміші від випаровування бензину. Початкова концентрація бензину $l_0 = 0,028$ кг/м³, динамічна активність вугілля по бензину $d_1 = 7,2$ % мас., кінцева активність після десорбції $d_2 = 0,78$ % мас., насипна густина вугілля $\rho_{нас} = 500$ кг/м³. Тривалість десорбції, сушки та охолодження адсорбенту складає $\tau = 1,33$ год. Виконати розрахунки для умов:

а) витрати суміші парів бензину і повітря $V = 1020; 1100,8; 1200; 1320; 1500; 1600; 1720; 1800; 2000; 3000; 3500; 3700; 4000$ м³/год. Швидкість бензино-повітряної суміші $\omega = 0,28$ м/с.

б) Витрати $V = 2500$ м³/г; швидкість $\omega = (0,1 \dots 1,1)$ м/с з кроком $0,05$ м/с.

4.17. Термокамера має стінку товщиною $\delta = 0,1$ м теплопровідністю матеріалу стінки $\lambda = 3,3$ Вт/(м*К). Температура в камері $t_e = 1100$ °С, зовні термокамери $t_n = 22$ °С Коефіцієнт тепловіддачі від термокамери в навколишнє середовище $\alpha_n = 38$ Вт/(м² К), у середині термокамери α_e може приймати наступні значення: 100; 200; 220; 300; 355; 500; 100, 1035; 1200, 1230; 1330; 1400; 1455; 1470; 1500; 2200 Вт/(м² К). Визначити залежність температури стінки всередині та зовні, теплового потоку тощо від коефіцієнта α_e . Формули:

$$t_1 = t_e - \frac{q}{\alpha_e};$$

$$t_2 = t_n + \frac{q}{\alpha_n};$$

$$q = \frac{t_e - t_n}{\frac{1}{\alpha_e} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_n}}.$$

Виконати розрахунки також за умов $\alpha_6 = 660 \text{ Вт/(м}^2 \text{ К)}$, $\delta = (0,02 \dots 0,3) \text{ м}$ з кроком $0,01 \text{ м}$.

4.18. Кришка апарата радіусом $a = 0,33 \text{ м}$ та товщиною $k = 0,02 \text{ м}$ знаходиться під дією тиску $p = 0,15 \text{ МПа}$. Визначити напруження N_r , N_τ , а також прогин I , якщо вона зроблена з сталі ($E = 2,1 \cdot 10^5 \text{ МПа}$, $\mu = 0,31$). Розрахунок виконати з кроком по радіусу $\Delta r = 0,005 \text{ м}$, а також в точках на відстані $r = (0,001; 0,006; 0,011; 0,018; 0,024; 0,028) \text{ м}$. Формули:

$$N_r = \frac{6 \cdot p}{16 \cdot k^2} \cdot [a^2(1 + \mu) - r^2(3 + \mu)];$$

$$N_\tau = \frac{6 \cdot p}{16 \cdot k^2} \cdot [a^2(1 + \mu) - r^2(1 + 3\mu)];$$

$$I = \frac{p}{64R} (a^2 - r^2)^3;$$

$$R = \frac{Ek^3}{12(1 - \mu)}.$$

4.19. Надані формули для розрахунку напружень σ_r і σ_τ та переміщень Y у сталевому балоні:

$$\sigma_r = \frac{r_1^2 \cdot p_1 - r_2^2 \cdot p_2}{r_2^2 - r_1^2} - \frac{(p_1 - p_2) \cdot r_1^2 \cdot r_2^2}{R^2 \cdot (r_2^2 - r_1^2)};$$

$$\sigma_\tau = \frac{r_1^2 \cdot p_1 - r_2^2 \cdot p_2}{r_2^2 + r_1^2} + \frac{(p_1 - p_2) \cdot r_1^2 \cdot r_2^2}{R^2 \cdot (r_2^2 - r_1^2)};$$

$$Y = \frac{1 - \mu}{E} \cdot \frac{r_1^2 \cdot p_1 - r_2^2 \cdot p_2}{r_2^2 - r_1^2} + \frac{1 + \mu}{E} \cdot \frac{(p_1 - p_2) \cdot r_1^2 \cdot r_2^2}{R^2 \cdot (r_2^2 - r_1^2)}.$$

Розміри балону: $r_1 = 0,21$ м, $r_2 = 0,44$ м. Тиск у балоні $p_1 = 162$ МПа, тиск ззовні $p_2 = 32$ МПа. Модуль пружності та коефіцієнт Пуассона для сталі: $E = 2,1 \cdot 10^5$ МПа, $\mu = 0,3$. Роздрукувати σ_T , σ_r , Y , R з кроком по радіусу $\Delta R = 0,02$ м.

Визначити окремо σ_T , σ_r , Y , при $R = (0,211; 0,217; 0,388; 0,411; 0,415; 0,418; 0,433)$ м.

4.20. Визначити зміщення серединної лінії стінки сталеві труби $r_{вн} = 0,2$ м, $r_{зов} = 0,32$ м та супутні величини. Коефіцієнт Пуассона сталі $\mu = 0,3$; модуль пружності $E = 2 \cdot 10^5$ МПа; $n = 2$. Розрахункова формула:

$$U = \frac{1 - \mu}{E} \frac{r_{вн}^n P_{вн} - r_{зов}^n P_{зов}}{r_{зов}^n - r_{вн}^n} r_{сер} + \frac{1 + \mu}{E} \frac{r_{вн}^n r_{зов}^n (P_{зов} - P_{вн})}{(r_{зов}^n - r_{вн}^n) r_{сер}},$$

$$\text{де } r_{сер} = \frac{r_{вн} + r_{зов}}{2}.$$

Розрахунок виконати для двох випадків:

а) Навантаження тиском $P_{вн} = 123$ МПа, $P_{зов} = (1 \dots 23,3)$ МПа з кроком розрахунку $0,01$ МПа.

б) Навантаження тиском $P_{вн} = (123; 122,1; 116; 111; 100,6; 89; 80; 77; 65; 53; 45; 41; 34; 28,2)$ МПа; $P_{зов} = 28$ МПа.

4.21. Для ребра пластинчатого теплообмінника, яке знаходиться у повздовжньому потоці турбулентного повітря швидкістю $V = 63$ м/с визначити значення місцевого коефіцієнта тепловіддачі α і розрахувати товщину прикордонного слою δ : а) для координат x від $0,04$ м до $1,2$ м з кроком $0,01$ м; б) для координат x , що приймають значення (м): $0,045; 0,06; 0,09; 0,12; 0,15; 0,2; 0,25; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 1,0$.

Формули та фізичні константи:

$$\delta = 0.37 \cdot x \cdot \text{Re}^{-0.2};$$

$$\text{Nu} = 2.55 \cdot 10^{-2} \text{Re}^{0.8};$$

$$\alpha = \text{Nu} \cdot \frac{\lambda}{x}; \quad \text{Re} = \frac{V}{\nu};$$

$$\nu = 14,6 \cdot 10^{-6} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}, \quad \lambda = 2,1 \cdot 10^{-2} \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}.$$

4.22. Визначити напруження σ_r і σ_T та переміщення u у товстостінному циліндрі $r_1 = 0,16$ м з отвором $r_2 = 0,29$ м під дією внутрішнього $p_1 = 150$ МПа та зовнішнього тиску $p_2 = 14$ МПа. Модуль пружності та коефіцієнт Пуассона для матеріалу циліндра: $\mu = 0,28$; $E = 2,8 \cdot 10^4$ МПа; Розрахункові формули:

$$\sigma_r = \frac{r_1^2 \cdot p_1 - r_2^2 \cdot p_2}{r_2^2 - r_1^2} - \frac{(p_1 - p_2) \cdot r_1^2 \cdot r_2^2}{R^2 \cdot (r_2^2 - r_1^2)};$$

$$\sigma_T = \frac{r_1^2 \cdot p_1 - r_2^2 \cdot p_2}{r_2^2 + r_1^2} + \frac{(p_1 - p_2) \cdot r_1^2 \cdot r_2^2}{R^2 \cdot (r_2^2 - r_1^2)};$$

$$u = \frac{1 - \mu}{E} \cdot \frac{r_1^2 \cdot p_1 - r_2^2 \cdot p_2}{r_2^2 - r_1^2} + \frac{1 + \mu}{E} \cdot \frac{(p_1 - p_2) \cdot r_1^2 \cdot r_2^2}{R^2 \cdot (r_2^2 - r_1^2)}.$$

Роздрукувати σ_T , σ_r , u , R з кроком по радіусу $\Delta R = \begin{cases} 0,01 & \text{якщо } r < R < 0,6 \\ 0,02 & \text{якщо } 0,6 \leq R \leq r_2 \end{cases}$.

Визначити окремо σ_T , σ_r , u , при $R = (0,134; 0,137; 0,142; 0,167; 0,184; 0,201; 0,283)$ м.

4.23. Термокамера має піношамотні стінки, товщиною $\delta = 0,28$ м. Температура внутрішньої поверхні стінок $t_{c1} = 1050$ °С, зовнішньої $t_{c2} = 70$ °С. Теплопровідність $\lambda_0 = 0,88$ Вт/(м К). Визначити перепад температур ΔT , температуру T^* стінки та супутні величини: а) на глибині $x = (0; 0,05; 0,1; 0,13;$

0,133; 0,15; 0,154; 0,18; 0,2; 0,23) м; б) на глибині x від 0,1 м до 0,27 м з кроком 0,01 м. Формули:

$$T = \sqrt{\left(\frac{1}{\beta} + t_{c1}\right)^2 - \frac{2 \cdot g x}{\lambda_0 \cdot \beta}} - \frac{1}{\beta};$$

$$g = \frac{\lambda}{\delta} \cdot (t_{c1} - t_{c2});$$

$$\lambda = \lambda_0 \left(1 + \beta \cdot \frac{t_{c1} + t_{c2}}{2}\right);$$

$$T^* = t_{c1} - \frac{t_{c1} - t_{c2}}{\delta} \cdot x;$$

$$\beta = \frac{1}{273 + t_{c1}}; \Delta T = T - T^*.$$

4.24. Кришка апарату діаметром $D = 0,3$ м та товщиною $k = 0,02$ м заходиться під дією тиску ацетилену $p = 0,28$ МПа. Визначити напруження δ_r, δ_τ , а також прогин кришки S , якщо вона зроблена з сталі ($E = 2,1 \cdot 10^5$ МПа, $\mu = 0,31$) з кроком 0,004 м по радіусу r , а також в точках: $r = (0; 0,007; 0,011; 0,013; 0,019; 0,027; 0,029)$ м. Формули:

$$a = D/2;$$

$$\delta_r = \frac{6 \cdot p}{16 \cdot k^2} \cdot [a^2(1 + \mu) - r^2(3 + \mu)];$$

$$\delta_\tau = \frac{6 \cdot p}{16 \cdot k^2} \cdot [a^2(1 + \mu) - r^2(1 + 3\mu)];$$

$$R = \frac{Ek^3}{12(1 - \mu)};$$

$$S = \frac{p}{64R} (a^2 - r^2)^3.$$

4.25. З резервуару, з температурою $T_0 = 380$ К та під тиском $P_0 = 5$ МПа, через конфузорне сопло витікає кисень у середовище з тиском P від 1 МПа до 3,8 МПа. Фізичні константи: $K = 1,4$; $R = 8314 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$; $\mu = 32$. Визначити швидкість витікання кисню V в залежності від тиску середовища P з кроком зміни 0,2 МПа, а також при $P = (1,1; 1,35; 1,66; 2,15; 2,73; 3,7)$ МПа. Формула:

$$V = \sqrt{2 \cdot \frac{k}{k-1} \cdot \frac{R}{\mu} \cdot T_0 \cdot \left[1 - \left(\frac{P}{P_0} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]}.$$

4.26. Клінкерна піч має стінку товщиною $\delta = 0,22$ м та теплопровідністю матеріалу стінки $\lambda = 4,23$ Вт/(м К). Температура в печі $t_g = 1330$ °С, температура ззовні $t_n = 28$ °С. Коефіцієнт тепловіддачі в навколишнє середовище ззовні печі $\alpha_n = 31$ Вт/(м² К). Коефіцієнт тепловіддачі в середовище у середині печі може складати $\alpha_g = (110; 115; 154; 165; 168; 173; 182; 201; 220; 233; 266; 278; 290; 320; 400; 630; 700; 770)$ Вт/(м² К).

Визначити залежність температури стінки всередині та зовні, тепловий потік тощо від коефіцієнта α_g . Формули:

$$t_1 = t_g - \frac{q}{\alpha_g}; \quad t_2 = t_n + \frac{q}{\alpha_n};$$

$$q = \frac{t_g - t_n}{\frac{1}{\alpha_g} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_n}}.$$

Виконати розрахунки також за умов $\alpha_g = 500$ Вт/(м² К), $\delta = (0,03 \dots 0,6)$ м з кроком 0,02 м.

4.27. Стінка термокамери для сушіння полікарбонату складається з двох шарів. Перший шар: товщина $\delta_1 = 0,09$ м; теплопровідність $\lambda_1 = 0,93$ Вт/(м К). Другий шар: $\delta_2 = 0,22$ м; $\lambda_2 = 2,83$ Вт/(м К). Температура у камері $t_e = 155$ °С, ззовні – $t_{cep} = 12$ °С. Визначити температуру t_1, t_2, t_3 на поверхні стінки камери та між шарами в залежності від коефіцієнта тепловіддачі $\alpha_e = (330; 312; 287; 250; 210; 177; 165; 150; 140; 132; 100; 96; 85; 74; 60; 55; 43; 35)$ Вт/(м² К).

Врахувати $\alpha_c = 320 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{К}}$. Розрахувати також залежність $q = f(\alpha_e)$ для діапазону $\alpha_e = (80 \dots 480)$ Вт/(м² К) з кроком 10 Вт/(м² К). Формули:

$$t_1 = t_e - \frac{q}{\alpha_e}; \quad t_2 = t_1 - q \frac{\delta_1}{\lambda_1};$$

$$t_3 = t_{cep} + q \frac{\delta_2}{\lambda_2};$$

$$q = \frac{t_e - t_{cep}}{\frac{1}{\alpha_e} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{1}{\alpha_c}}.$$

4.28. Визначити залежність товщини гідродинамічного шару рідини δ на відстані $x = (0,01; 0,022; 0,025; 0,16; 0,2; 0,26; 0,1; 0,41; 0,33; 0,38; 0,9; 0,62; 1,04; 0,75)$ м, якщо рідина обтікає плоске ребро конструкції довжиною $l = 1,8$ м.

Параметри рідини в потоці: $\nu = 3,2 \frac{\text{м}^2}{\text{с}}; t_0 = 22$ °С; $\nu = 15,06 \cdot 10^{-6} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}; Pe = 0,703;$

$\lambda = 2,6 \cdot 10^{-2} \frac{\text{Вт}}{\text{м К}}$. Також визначити залежність коефіцієнта тепловіддачі α від

координати x , за умови $x = (0,3 \dots l)$ м з кроком 5 см. Формули:

$$\delta = \frac{4,64x}{\sqrt{\text{Re}}};$$

$$\text{Re} = \frac{\nu x}{\nu};$$

$$\alpha = \mu_u \frac{\lambda}{x};$$

$$\mu_u = 0,335 \text{Re}^{\frac{1}{2}} \cdot \text{Pe}^{\frac{1}{3}}.$$

4.29. Подвійна термоізоляційна стінка виготовлена з двох шарів. Перший має товщину δ_1 і коефіцієнт теплопровідності $\lambda_1 = 4,3 \frac{\text{Вт}}{\text{м К}}$, а другий – $\delta_2 = 0,06$ м і $\lambda_2 = 0,75 \frac{\text{Вт}}{\text{м К}}$, відповідно. Температура однієї з сторін стінки $t_{\text{зоп}} = 1220$ °С, з іншої – $t_{\text{хол}} = 16$ °С. Коефіцієнти тепловіддачі від стінки $\alpha_{\text{хол}} = 26$ Вт/(м К). Тепловий потік крізь стінку $\Theta = 960$ Вт/м. Визначити температуру поверхонь стінок t_1, t_2, t_3 в залежності від товщини слою $\delta_1 = (0,12; 0,13; 0,282; 0,22; 0,2; 0,186; 0,152; 0,11; 0,093; 0,07; 0,062)$ м. Визначити також коефіцієнт α_1 , якщо $\delta_1 = 0,05$ м, а $\delta_2 = (0,08 \dots 0,001)$ змінюється з кроком 0,001 м. Формули:

$$\alpha_1 = \frac{1}{\beta};$$

$$t_1 = t_{\text{зоп}} - \frac{\Theta}{\alpha_1};$$

$$t_3 = t_2 - \Theta \frac{\lambda_2}{\delta_2};$$

$$t_2 = t_1 - \Theta \frac{\lambda_1}{\delta_1};$$

$$\beta = \frac{t_{\text{зоп}} - t_{\text{хол}}}{\Theta} - \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{1}{\alpha_{\text{хол}}}.$$

4.30. До каналу охолодження валка каландру подається вода зі швидкістю $g = 0,18$ м/с. Температура стінок каналу $t_c = 58$ °С. Довжина каналу $l = 1,6$ м. Температура води на вході $t_{\text{вх}} = 9$ °С, на виході $t_{\text{вих}} = 33$ °С. Визначити коефіцієнт тепловіддачі α , якщо діаметр каналу $d = (0,002; 0,003; 0,006; 0,01; 0,011; 0,015;$

0,012; 0,021; 0,025; 0,03) м, а також величину теплового потоку Q в залежності від діаметру d , якщо діапазон його зміни складає від 0,005 м до 0,025 м з кроком 0,0005 м. Прийняти наступні значення фізичних коефіцієнтів: $\nu_{жс} = 1,17 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$; $C_p = 4,12 \cdot 10^{-3} \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$; $\lambda_{жс} = 0,73 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$; $\rho_{жс} = 998,65 \text{ кг}/\text{м}^3$; $\mu_{жс} = 1150 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с}$; $\mu_c = 550,6 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с}$. Формули:

$$G = \rho_{жс} g \frac{\pi d^2}{4}; \quad \text{Re} = \frac{gd}{\nu_{жс}};$$

$$Q = \alpha [t_c - 0,5(t_{вх} + t_{вих})] \pi d l;$$

$$\alpha = \text{Nu} \frac{\lambda_{жс}}{d}; \quad \text{Pe} \frac{d}{l} = \frac{4G C_p}{\pi l \lambda_{жс}};$$

$$\text{Nu} = 1,55 \left(\text{Pe} \frac{d}{l} \right)^{1/3} \left(\frac{\mu_{жс}}{\mu_c} \right)^{0,14} \cdot \varepsilon;$$

$$\varepsilon = 0,6 \left(\frac{1}{\text{Re}} \frac{l}{d} \right)^{-1/7} \left(1 + 2,5 \frac{1}{\text{Re}} \frac{l}{d} \right).$$

4.31. У компресійній камері стискається газ об'ємом V від початкового тиску $P_1 = 3 \text{ кг}/\text{см}^2$ до тиску $P_2 = 22 \text{ кг}/\text{см}^2$. Початкова температура газу $t_1 = 5^\circ \text{C}$; КПД компресора $\eta = 0,7$. Теплофізичні константи: $\gamma = 0,76 \text{ кг}/\text{м}^3$; $k = 1,23$; $R = 489,5 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$. Визначити потужність W (Вт), що споживається при стисканні, у залежності від об'єму газу V , при його зміні від 40 до 400 $\text{м}^3/\text{год}$ з кроком 10 $\text{м}^3/\text{год}$, а також теоретичну роботу L (Дж/кг) для значень $V = (12; 13; 15,2; 16,4; 18,3; 94; 20; 30; 43,6; 140; 288; 300) \text{ м}^3/\text{год}$. Формули:

$$W = \frac{GL}{3600\eta 10^3}; \quad G = V\gamma;$$

$$L = \frac{k}{k-1} R t_1 \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right].$$

4.32. Технологічний корпус теплоізований спіненим полімером товщиною $\delta_2 = 0,07$ м, а саме стінка корпусу має товщину $\delta_1 = 0,2$ м. Температура усередині корпусу $T_i = 388$ К, навколишнього середовища ззовні $-T_0 = 280$ К, коефіцієнт тепловіддачі у навколишнє середовище $\alpha = 50$ Вт/(м²·К). Визначити величину теплового потоку:

а) при наявності термоізоляції за формулою

$$q = \frac{T_i - T_0}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{1}{\alpha}},$$

коефіцієнти теплопровідності: $\lambda_1 = 12$ Вт/(м·К); $\lambda_2 = (0,05 \dots 9)$ Вт/(м·К) з кроком 0,05 Вт/(м·К);

б) у відсутності термоізоляції за формулою

$$q = \frac{T_i - T_0}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{1}{\alpha}},$$

коефіцієнт теплопровідності $\lambda_1 = (21; 18; 19; 17; 5; 3; 1,6; 1,1; 0,6)$ Вт/(м·К).

Визначити температуру на зовнішній поверхні стінки $T_{\text{хол}}$ і температуру на границі шарів корпусу $T_{\text{гран}}$ за умов варіанта а). Формули:

$$T_{\text{гран}} = T_i - q \frac{\delta_1}{\lambda_1}; \quad T_{\text{хол}} = T_0 + \frac{q}{\alpha}.$$

4.33. Визначити величину теплового потоку q у процесі кристалізації водного розчину CaNO_3 (та супутні величини), якщо тепло відводиться з теплообмінної поверхні з площею $S = 1,5$ м² при охолодженні розчину від температури $t_1 = 88$ °С до $t_2 = 39$ °С, який вміщує $m_1 = 14,9$ моль CaNO_3 на

кількість $V = 965$ г води, з урахуванням випаровування $k = 5\%$ вихідної кількості розчину. Концентрація насиченого розчину при 39°C складає $m_2 = 12,8$ моль на $V = 965$ г води. Маса CaNO_3 $\mu = 8,5$ кг/моль; питома теплота кристалізації $q_{yd} = 2,16 \cdot 10^5$ Дж/моль; питома теплоємність твердої солі складає $C_p = 2470$ Дж/(кг·К); $\chi_{np}=1$; питома теплота пароутворення води складає $r = 2,343 \cdot 10^5$ Дж/кг. Продуктивність процесу кристалізації по розчину G складає 4100; 4220; 4720; 5000; 5300; 5600; 5900; 6000; 6500; 6980 кг/год. Формули:

$$G_{np} = \frac{G(\chi_2 - \chi_1) - W\chi_1}{\chi_2 - \chi_{np}};$$

$$W = Gk \frac{1}{100};$$

$$q = \frac{GC_p}{S}(t_1 - t_2) + G_{np}q_{yd} \frac{1}{S} - \frac{Wr}{S};$$

$$\chi_1 = \frac{m_1\mu}{V + m_1\mu}; \quad \chi_2 = \frac{m_2\mu}{V + m_2\mu}.$$

Розрахувати також залежність кількості кристалів G_{np} від продуктивності G при $G = (4 \cdot 10^3 \dots 7 \cdot 10^3)$ кг/ч з кроком 100 кг/ч.

4.34. У насадочному адсорбері відбувається поглинання парів бензолу з інертного газу під атмосферним тиском. Адсорбер наповнений адсорбентом з показниками: $G = 61$ м²/м³; $V_{cs} = 0,58$ м³/м³. Визначити коефіцієнт масопередачі β та супутні величини, якщо швидкість проходження газів крізь адсорбер U складає 0,04; 0,1; 0,13; 0,14; 0,17; 0,177; 0,21; 0,234; 0,25 м/с. Газова фаза має наступні властивості: $\rho = 1,11$ кг/м³; $\mu = 0,17$ Па·с; $D = 11,6 \cdot 10^{-6}$ м²/с. Формули:

$$\beta = Nu \frac{D}{d}; \quad d = 4V_{cs} \frac{1}{G};$$

$$Nu = 0,407 \text{Re}^{0,655} \text{Pr}^{0,33};$$

$$\text{Pr} = \frac{\mu}{\rho D}; \quad \text{Re} = 4 \frac{U \rho}{G \mu}.$$

Виконати також розрахунки за умови $U = 0,2$ м/с, якщо G змінюється від $28 \text{ м}^2/\text{м}^3$ до $58,5 \text{ м}^2/\text{м}^3$, з кроком $0,1 \text{ м}^2/\text{м}^3$.

4.35. Ковпачкові тарілки встановлені в ректифікаційній колоні на відстані $H = 320$ мм одна від одної. Визначити діаметр D (м) колони, якщо густина пари $\rho_0 = 1,27 \text{ кг/м}^3$, тиск $p_0 = 1,1 \text{ кг/см}^2$, густина рідини $\rho_p = 620 \text{ кг/м}^3$, абсолютний тиску у колоні $p = 1,33 \text{ кг/см}^2$, середня температура $T = 230 \text{ К}$. Крізь колону прокачується $U = 1250; 1330; 1420; 1660; 1770; 1820; 1990; 2100; 2150; 2330; 2500; 3070; 3400; 3660; 3810 \text{ м}^3/\text{год}$ пари. Розрахувати також залежність $D = f(p)$ при $p = 0,1 \dots 2,1 \text{ м}^3/\text{год}$ з кроком $0,1 \text{ м}^3/\text{год}$ при $l_0 = 2800 \text{ м/год}$. Формули :

$$\rho_n = \frac{\rho_0 \cdot T_0 \cdot p}{T \cdot p_0};$$

$$\omega = l \sqrt{\frac{\rho_p}{\rho_0}};$$

$$S = \frac{V}{\omega}; \quad D = \sqrt{\frac{S}{0,785}};$$

$$l = 0,0315; \quad T_0 = 237 \text{ К};$$

$$V = \frac{U \cdot T \cdot p_0}{T_0 \cdot p \cdot 3600}.$$

4.36. У адсорбері періодичної дії очищується бензино-повітряна суміші від випаровувань бензину. Початкова концентрація бензину $U = 0,028 \text{ кг/м}^3$, динамічна активність вугілля по бензину $d_1 = 7,4 \%$ мас., кінцева активність після десорбції $d_2 = 0,77 \%$ мас., насипна густина вугілля $\rho_{\text{нас}} = 530 \text{ кг/м}^3$. Тривалість десорбції, сушки та охолодження адсорбенту складає $\tau = 1,4$ год.

Кількість активного вугілля (кг):

$$G = \frac{V \cdot \tau \cdot U}{d_1 - d_2}.$$

Висота слою вугілля (м):

$$H = \frac{G}{\rho_{nac} \cdot 0,785 \cdot D^2}.$$

Діаметр адсорбера (м):

$$D = \sqrt{\frac{V}{3600 \cdot 0,785 \cdot \omega}}.$$

Виконати розрахунки для умов:

а) Витрати суміші парів бензину і повітря $V = (100; 1004,8; 1220; 1320; 1506; 1601; 1720; 1807; 2000; 3010; 3500; 3770; 4035)$ м³/год. Швидкість бензино-повітряної суміші $\omega = 0,22$ м/с.

б) Витрати $V = 2600$ м³/г; швидкість $\omega = (0,1 \dots 1,3)$ м/г з кроком 0,05 м/с.

4.37. Теплопровідність стінки термокамери $\lambda = 3,8$ Вт/(м К). Стінка має товщину $\delta = 0,25$ м. Температура в камері $t_{\text{в}} = 1000$ °С ззовні $t_{\text{н}} = 18$ °С. Коефіцієнт тепловіддачі в навколишнє середовище $\alpha_{\text{н}} = 41$ Вт/(м² К), у середині термокамери $\alpha_{\text{в}} = (80; 92; 96; 101; 108; 132; 78; 150; 118; 141; 360; 344; 625; 780; 1020; 1340; 1560)$ Вт/(м² К). Визначити залежність від коефіцієнта $\alpha_{\text{в}}$ для температури стінки всередині, ззовні та для теплового потоку q , тощо. Формули:

$$t_1 = t_{\text{в}} - \frac{q}{\alpha_{\text{в}}}; \quad t_2 = t_{\text{н}} + \frac{q}{\alpha_{\text{н}}};$$

$$q = \frac{t_{\text{в}} - t_{\text{н}}}{\frac{1}{\alpha_{\text{в}}} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_{\text{н}}}}.$$

Виконати розрахунки також за умов $\alpha_{\text{в}} = 655 \text{ Вт/(м}^2 \text{ К)}$, та при зміні δ від 0,05 м до 0,35 м з кроком 0,01 м.

4.38. Заслінка трубопроводу габаритним радіусом $a = 0,36$ м та товщиною $k = 0,03$ м знаходяться під дією тиску $p = 0,13$ МПа. Визначити напруження T_r , T_{τ} , а також прогин заслінки Y , якщо вона зроблена з полімеру ($E = 2,3 \cdot 10^3$ МПа, $\mu = 0,22$). Розрахунок виконати з кроком $\Delta r = 0,005$ м по радіусу r від нуля до габаритного радіуса a , а також в точках: $r = (0,001; 0,003; 0,011; 0,018; 0,023; 0,027; 0,206)$ м. Формули:

$$N_r = \frac{6 \cdot p}{16 \cdot k^2} \cdot [a^2(1 + \mu) - r^2(3 + \mu)];$$

$$N_{\tau} = \frac{6 \cdot p}{16 \cdot k^2} \cdot [a^2(1 + \mu) - r^2(1 + 3\mu)];$$

$$R = \frac{Ek^3}{12(1 - \mu)};$$

$$Y = \frac{p}{64R} (a^2 - r^2)^3.$$

4.39. Надані формули для розрахунку напружень σ_r і σ_T та переміщення u у сталевому корпусі екструдера:

$$\sigma_r = \frac{r_1^2 \cdot p_1 - r_2^2 \cdot p_2}{r_2^2 - r_1^2} - \frac{(p_1 - p_2) \cdot r_1^2 \cdot r_2^2}{R^2 \cdot (r_2^2 - r_1^2)};$$

$$\sigma_T = \frac{r_1^2 \cdot p_1 - r_2^2 \cdot p_2}{r_2^2 + r_1^2} + \frac{(p_1 - p_2) \cdot r_1^2 \cdot r_2^2}{R^2 \cdot (r_2^2 - r_1^2)};$$

$$u = \frac{1-\mu}{E} \cdot \frac{r_1^2 \cdot p_1 - r_2^2 \cdot p_2}{r_2^2 - r_1^2} + \frac{1+\mu}{E} \cdot \frac{(p_1 - p_2) \cdot r_1^2 \cdot r_2^2}{R^2 \cdot (r_2^2 - r_1^2)}.$$

Розміри корпусу: $r_1 = 0,045$ м, $r_2 = 0,3$ м. Тиск у корпусі $p_1 = 50$ МПа, та ззовні $p_2 = 3$ МПа. Модуль пружності та коефіцієнт Пуассона для сталі: $E = 2,1 \cdot 10^5$ МПа, $\mu = 0,3$. Роздрукувати σ_T , σ_r , u , R з кроком по радіусу $\Delta R = 0,01$ м. Визначити окремо σ_T , σ_r , u , при $R = (0,211; 0,217; 0,046; 0,048; 0,049; 0,243; 0,254; 0,258)$ м.

4.40. Визначити зміщення серединної лінії стінки сталеві труби $r_{вн} = 0,3$ м, $r_{зов} = 0,35$ м та супутні величини. Коефіцієнт Пуассона сталі $\mu = 0,3$; модуль пружності $E = 2,1 \cdot 10^5$ МПа; $n=2$. Розрахункова формула:

$$U = \frac{1-\mu}{E} \frac{r_{вн}^n P_{вн} - r_{зов}^n P_{зов}}{r_{зов}^n - r_{вн}^n} r_{сер} + \frac{1+\mu}{E} \frac{r_{вн}^n r_{зов}^n (P_{зов} - P_{вн})}{(r_{зов}^n - r_{вн}^n) r_{сер}},$$

де $r_{сер} = \frac{r_{вн} + r_{зов}}{2}$.

Розрахунок виконати для двох випадків:

- 1) Навантаження тиском $P_{вн} = 128$ МПа, $P_{зов} = (1 \dots 12)$ МПа з кроком зміни $0,01$ МПа.
- 2) Навантаження тиском $P_{вн} = (123; 122,1; 116; 111; 100; 89; 80; 77; 65; 53; 45; 41; 34; 28)$ МПа; $P_{зов} = 28$ МПа.

4.41. У процесі кристалізації тепло відводиться з теплообмінної поверхні площею $S = 1,8$ м². Визначити величину теплового потоку q (та супутні величини), якщо при охолодженні розчину від температури $t_1 = 78$ °С до температури $t_2 = 29$ °С, Кількість речовини $m_1 = 14,9$ моль на кількість води $V = 950$ г. Має місце випаровування $k = 3,5\%$ вихідної кількості розчину. Концентрація насиченого розчину при 29 °С складає $m_2 = 12,8$ моль на $V = 950$ г води. Маса речовини $\mu = 8,2$ кг/моль; питома теплота кристалізації складає

$q_{yd} = 2,2 \cdot 10^5$ Дж/моль; $\chi_{np}=1$; питома теплоємність твердої фази складає $C_p = 2330$ Дж/(кг·К); питома теплота пароутворення води $r = 2,343 \cdot 10^5$ Дж/кг. Продуктивність процесу кристалізації по розчину G складає 4000; 4120; 4420; 5010; 5310; 5600; 5800; 6020; 6500; 6900 кг/год. Формули:

$$G_{np} = \frac{G(\chi_2 - \chi_1) - W\chi_1}{\chi_2 - \chi_{np}}; \quad W = Gk \frac{1}{100};$$

$$q = \frac{GC_p}{S}(t_1 - t_2) + G_{np}q_{yd} \frac{1}{S} - \frac{W r}{S};$$

$$\chi_1 = \frac{m_1 \mu}{V + m_1 \mu}; \quad \chi_2 = \frac{m_2 \mu}{V + m_2 \mu}.$$

Розрахувати також залежність кількості кристалів G_{np} від продуктивності G при $G = (3 \cdot 10^3 \dots 6 \cdot 10^3)$ кг/ч з кроком 100 кг/ч.

4.42. До каналу барботеру шнеку екструдера подається вода зі швидкістю $g = 0,12$ м/с. Температура стінок каналу $t_c = 55$ °С. Довжина каналу $l = 1,3$ м. Температура води на вході $t_{ex} = 10$ °С, на виході $t_{vux} = 35$ °С. Визначити коефіцієнт тепловіддачі α , якщо діаметр каналу $d = (0,001; 0,002; 0,0035; 0,01; 0,012; 0,014; 0,0125; 0,021; 0,023; 0,0275)$ м, а також величину теплового потоку Q в залежності від діаметру d , якщо діапазон його зміни складає від 0,0025 м до 0,025 м з кроком 0,0005 м. Прийняти наступні значення фізичних коефіцієнтів: $\nu_{жс} = 1,2 \cdot 10^{-6}$ м²/с; $C_p = 4,1 \cdot 10^{-3}$ Дж/(кг·К); $\lambda_{жс} = 0,71$ Вт/(м·К); $\rho_{жс} = 999$ кг/м³; $\mu_{жс} = 1100 \cdot 10^{-6}$ Па·с; $\mu_c = 555 \cdot 10^{-6}$ Па·с. Формули:

$$G = \rho_{жс} g \frac{\pi d^2}{4}; \quad Re = \frac{gd}{\nu_{жс}};$$

$$Q = \alpha [t_c - 0,5(t_{ex} + t_{vux})] \pi d l;$$

$$\alpha = Nu \frac{\lambda_{жс}}{d}; \quad Pe \frac{d}{l} = \frac{4G C_p}{\pi l \lambda_{жс}};$$

$$Nu = 1,55 \left(Pe \frac{d}{l} \right)^{1/3} \left(\frac{\mu_{жс}}{\mu_c} \right)^{0,14} \cdot \varepsilon;$$

$$\varepsilon = 0,6 \left(\frac{1}{Re} \frac{l}{d} \right)^{-1/7} \left(1 + 2,5 \frac{1}{Re} \frac{l}{d} \right).$$

4.43. Визначити напруження σ_r і σ_T та переміщення u у стінці гідроциліндру $r_1 = 0,4$ м з отвором $r_2 = 0,6$ м під дією внутрішнього тиску $p_1 = 110$ МПа та зовнішнього тиску $p_2 = 12$ МПа. Модуль пружності та коефіцієнт Пуассона для матеріалу циліндра: $\mu = 0,3$; $E = 2,1 \cdot 10^5$ МПа; Розрахункові формули:

$$\sigma_r = \frac{r_1^2 \cdot p_1 - r_2^2 \cdot p_2}{r_2^2 - r_1^2} - \frac{(p_1 - p_2) \cdot r_1^2 \cdot r_2^2}{R^2 \cdot (r_2^2 - r_1^2)};$$

$$\sigma_T = \frac{r_1^2 \cdot p_1 - r_2^2 \cdot p_2}{r_2^2 + r_1^2} + \frac{(p_1 - p_2) \cdot r_1^2 \cdot r_2^2}{R^2 \cdot (r_2^2 - r_1^2)};$$

$$u = \frac{1 - \mu}{E} \cdot \frac{r_1^2 \cdot p_1 - r_2^2 \cdot p_2}{r_2^2 - r_1^2} + \frac{1 + \mu}{E} \cdot \frac{(p_1 - p_2) \cdot r_1^2 \cdot r_2^2}{R^2 \cdot (r_2^2 - r_1^2)}.$$

Роздрукувати σ_T , σ_r , u , R з кроком по радіусу $\Delta R = \begin{cases} 0,01 & \text{якщо } r < R < 0,5 \\ 0,02 & \text{якщо } 0,5 \leq R \leq r_2 \end{cases}$.

Визначити окремо σ_T , σ_r , u , при $R = (0,41; 0,421; 0,442; 0,453; 0,467; 0,478; 0,503)$ м.

4.44. Переборка у апараті радіусом $a = 0,5$ м та товщиною $k = 0,025$ м знаходиться під дією тиску $p = 0,1$ МПа. Визначити напруження N_r , N_τ , а також прогин переборки I , якщо вона зроблена з полімеру ($E = 2,6 \cdot 10^3$ МПа, $\mu = 0,21$). Розрахунок виконати з кроком по радіусу $\Delta r = 0,002$ м, а також в точках: $r = (0,0012; 0,0065; 0,0112; 0,0183; 0,0246; 0,0288; 0,1256)$ м. Формули:

$$N_r = \frac{6 \cdot p}{16 \cdot k^2} \cdot [a^2(1 + \mu) - r^2(3 + \mu)];$$

$$N_r = \frac{6 \cdot p}{16 \cdot k^2} \cdot [a^2(1 + \mu) - r^2(1 + 3\mu)];$$

$$I = \frac{p}{64R} (a^2 - r^2)^3;$$

$$R = \frac{Ek^3}{12(1 - \mu)}.$$

4.45. Адсорбер для очистки газів наповнений адсорбентом, для якого $G = 52 \text{ м}^2/\text{м}^3$; $V_{ce} = 0,5 \text{ м}^3/\text{м}^3$. Визначити коефіцієнт масопередачі β та супутні величини, якщо швидкість проходження газів крізь адсорбер $W = (0,04; 0,12; 0,16; 0,14; 0,175; 0,192; 0,221; 0,245; 0,258) \text{ м/с}$. Газова фаза має наступні властивості: $\rho = 1,1 \text{ кг/м}^3$; $\mu = 0,17 \text{ Па}\cdot\text{с}$; $D = 11,4 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$. Формули:

$$\beta = Nu \frac{D}{d}; \quad d = 4V_{ce} \frac{1}{G};$$

$$Nu = 0,407 Re^{0,655} Pr^{0,33};$$

$$Pr = \frac{\mu}{\rho D}; \quad Re = 4 \frac{W\rho}{G\mu}.$$

Виконати також розрахунки за умови $W = 0,23 \text{ м/с}$, якщо G змінюється від 32 до $63,5 \text{ м}^2/\text{м}^3$, з кроком $0,1 \text{ м}^2/\text{м}^3$.

ТЕМА5. РОБОТА З ІНТЕГРОВАНИМ СЕРЕДОВИЩЕМ РОЗРОБКИ ДОДАТКІВ

Засобами MSDev (FPS 4) обчислити залежність $y=f(x)$ отримати 200...300 значень. Розробити таблицю ідентифікаторів і блок-схему алгоритму, побудувати діаграми.

$$5.1. y = 18,6 \sin(x - 2\pi/3) + \frac{c}{6qk^c}; \quad k = 1,2; \quad c = 2,2; \quad q = 6,54; \quad x = 0..2\pi$$

$$5.2. y = \frac{2,16 \cos(x-2\pi/3)}{25q} - \frac{3,12c}{G^c}; \quad c = 0,12; \quad G = 124; \quad q = 7,3; \quad x = 0 \dots 2\pi$$

$$5.3. y = \frac{\sqrt{G(2\pi/3)+\cos(x-2\pi/3)}}{12,2qG^c} + 12,1; \quad x = 0 \dots 2\pi; \quad G = 118,1; \quad c = 0,33; \quad q = 2,11$$

$$5.4. y = \frac{\sqrt{G-\cos(x-2\pi/3)}}{16,2qc(G-3)} + 11,7; \quad x = 0 \dots 2\pi; \quad G = 76,2; \quad c = 11,2; \quad q = 0,23$$

$$5.5. y = \frac{2,16 \sin(x-2\pi/3)-32,1c}{25qG^c} + 4; \quad x = 0 \dots 2\pi; \quad c = 0,12; \quad G = 124,4; \quad q = 1,12$$

$$5.6. y = \frac{\sqrt{\pi G+\cos(x-2\pi/3)}}{15,6qG^{2c}} + 13,2; \quad x = 0 \dots 2\pi; \quad G = 121,3; \quad c = 0,25; \quad q = 0,93$$

$$5.7. y = tg(x - 0,01) + \frac{\sin(x-2\pi/3)}{qc} + 13,2G; \quad x = 0 \dots \pi/4; \quad G = 11,1; \quad c = 17,3; \quad q = 17,5$$

$$5.8. y = arctg(x - 0,11) + \frac{\sqrt{30G-6,2}}{qc}; \quad x = 0 \dots 1; \quad G = 1,6; \quad c = 12,7; \quad q = 0,58$$

$$5.9. y = lg G + \frac{tg(x+0,1)}{qc}; \quad x = 0 \dots 2\pi/3; \quad G = 18,7; \quad c = 12,2; \quad q = 0,88$$

$$5.10. y = \frac{18,7tg(x-0,11)}{13,5cqG} - 12,7; \quad x = 0 \dots \pi/4; \quad c = 0,3; \quad G = 18,7; \quad q = 0,94$$

$$5.11. y = \frac{\sin(\pi x-3,3)}{18,1Gq} - \sqrt{12G+k}; \quad k = 16,7; \quad G = 1,13; \quad q = 0,55; \quad x = 0 \dots \pi$$

$$5.12. y = 18,7 \frac{tg(x+0,01)}{13,5cG^c q} - 2; \quad x = 0 \dots \pi/8; \quad c = 0,3, \quad G = 18; \quad q = 16,2$$

$$5.13. y = tg(x - 0,012) + \frac{18,7 \sin(x-2\pi/3)}{qcG}; \quad x = 0 \dots \pi/8; \quad G = 11,1; \quad c = 17,3; \quad q = 3,1$$

$$5.14. y = \frac{\sin(x-2\pi/3)}{q^k G} - 0,16c; \quad x = 0 \dots 2\pi; \quad k = 0,25; \quad G = 2\pi; \quad c = 1,2; \quad q = 6$$

$$5.15. y = \frac{2,16 \cos(x-2\pi/3)}{25qG^c} + 32,1c; \quad x = 0 \dots 2\pi; \quad c = 1,2; \quad G = 124,2; \quad q = 12,33$$

$$5.16. y = \frac{\sqrt{G - \sin(x - 2\pi/3)}}{qc(G-3)} + 6.12q; \quad x = 0 \dots 2\pi; \quad G = 76,1; \quad c = 10; \quad q = 2,1$$

$$5.17. y = 28,2k \frac{\sin(x - 2\pi/3)}{6qk^c} + 12,4; \quad k = 18,2; \quad c = 2,3; \quad q = 1,33; \quad x = 0 \dots 2\pi$$

$$5.18. y = 26,8N \frac{\sin(\pi - \frac{2\pi}{3})}{cqk^c} + 3; \quad x = 0 \dots 2\pi; \quad N = 18,2; \quad q = 16,2; \quad k = 1,6; \quad c = 3,1$$

$$5.19. y = \frac{\sin(x - \frac{2\pi}{3}) - 0,16c}{q^k * G} + 1; \quad q = 2,2; \quad x = 0 \dots 2\pi; \quad k = 2; \quad G = 2\pi; \quad c = 1,2$$

$$5.20. y = \frac{2,16 \cos(x - \frac{2\pi}{3}) - 32,1c}{25qG^c} + 4; \quad q = 7,1; \quad x = 0 \dots 2\pi; \quad c = 0,12; \quad G = 124$$

$$5.21. y = \frac{\sqrt{\cos(\frac{2\pi}{3}) + \sin(x - \frac{2\pi}{3})}}{12,6qG^c} + 12,2; \quad x = 0 \dots 2\pi; \quad G = 118,1; \quad c = 0,33; \quad q = 1,1$$

$$5.22. y = \frac{615 \sqrt{G - \sin(x - \frac{2\pi}{3})}}{16,2qc(G-3)} + 12; \quad x = 0 \dots 2\pi; \quad G = 76,2; \quad c = 11; \quad q = 2,2$$

$$5.23. y = 18,6 \sin(x - 2\pi/3) + \frac{c}{6qk^c}; \quad k = 1,2; \quad c = 2,2; \quad q = 6,54; \quad x = 0 \dots 2\pi$$

$$5.24. y = \frac{2,16 \cos(x - 2\pi/3)}{25q} - \frac{3,12c}{G^c}; \quad c = 0,12; \quad G = 124; \quad q = 7,3; \quad x = 0 \dots 2\pi$$

$$5.25. y = \frac{\sqrt{G(2\pi/3) + \cos(x - 2\pi/3)}}{12,2qG^c} + 12,1; \quad x = 0 \dots 2\pi; \quad G = 118,1; \quad c = 0,33; \quad q = 2,11$$

$$5.26. y = \frac{\sqrt{G - \cos(x - 2\pi/3)}}{16,2qc(G-3)} + 11,7; \quad x = 0 \dots 2\pi; \quad G = 76,2; \quad c = 11,2; \quad q = 0,23$$

$$5.27. y = \frac{2,16 \sin(x - 2\pi/3) - 32,1c}{25qG^c} + 4; \quad x = 0 \dots 2\pi; \quad c = 0,12; \quad G = 124,4; \quad q = 1,12$$

$$5.28. y = \frac{\sqrt{\pi G + \cos(x - 2\pi/3)}}{15,6qG^{2c}} + 13,2; \quad x = 0 \dots 2\pi; \quad G = 121,3; \quad c = 0,25; \quad q = 0,93$$

$$5.29. y = tg(x - 0,01) + \frac{\sin(x-2\pi/3)}{qc} + 13,2G; \quad x = 0 \dots \pi/4; \quad G = 11,1; \quad c = 17,3; \quad q = 17,5$$

$$5.30. y = arctg(x - 0,11) + \frac{\sqrt{30G-6,2}}{qc}; \quad x = 0 \dots 1; \quad G = 1,6; \quad c = 12,7; \quad q = 0,58$$

$$5.31. y = lg G + \frac{tg(x+0,1)}{qc}; \quad x = 0 \dots 2\pi/3; \quad G = 18,7; \quad c = 12,2; \quad q = 0,88$$

$$5.32. y = \frac{18,7tg(x-0,11)}{13,5cqG} - 12,7; \quad x = 0 \dots \pi/4; \quad c = 0,3; \quad G = 18,7; \quad q = 0,94$$

$$5.33. y = \frac{\sin(\pi x-3,3)}{18,1Gq} - \sqrt{12G+k}; \quad k = 16,7; \quad G = 1,13; \quad q = 0,55; \quad x = 0 \dots \pi$$

$$5.34. y = 18,7 \frac{tg(x+0,01)}{13,5cG^c q} - 2; \quad x = 0 \dots \pi/8; \quad c = 0,3, \quad G = 18; \quad q = 16,2$$

$$5.35. y = tg(x - 0,012) + \frac{18,7 \sin(x-2\pi/3)}{qcG}; \quad x = 0 \dots \pi/8; \quad G = 11,1; \quad c = 17,3; \quad q = 3,1$$

$$5.36. y = \frac{\sin(x-2\pi/3)}{q^k G} - 0,16c; \quad x = 0 \dots 2\pi; \quad k = 0,25; \quad G = 2\pi; \quad c = 1,2; \quad q = 6$$

$$5.37. y = \frac{2,16 \cos(x-2\pi/3)}{25qG^c} + 32,1c; \quad x = 0 \dots 2\pi; \quad c = 1,2; \quad G = 124,2; \quad q = 12,33$$

$$5.38. y = \frac{\sqrt{G-\sin(x-2\pi/3)}}{qc(G-3)} + 6,12q; \quad x = 0 \dots 2\pi; \quad G = 76,1; \quad c = 10; \quad q = 2,1$$

$$5.39. y = 28,2k \frac{\sin(x-2\pi/3)}{6qk^c} + 12,4; \quad k = 18,2; \quad c = 2,3; \quad q = 1,33; \quad x = 0 \dots 2\pi$$

$$5.40. y = 26,8N \frac{\sin(\pi-\frac{2\pi}{3})}{cqk^c} + 3; \quad x = 0 \dots 2\pi; \quad N=18,2; \quad q=16,2; \quad k=1,6; \quad c=3,1$$

$$5.41. y = \frac{\sin(x-\frac{2\pi}{3})-0,16c}{q^{k*G}} + 1; \quad q = 2,2; \quad x = 0 \dots 2\pi; \quad k = 2; \quad G = 2\pi; \quad c = 1,2$$

$$5.42. y = \frac{2,16 \cos(x-\frac{2\pi}{3})-32,1c}{25qG^c} + 4; \quad q = 7,1; \quad x = 0 \dots 2\pi; \quad c = 0,12; \quad G = 124$$

$$5.43. y = \frac{\sqrt{G(\frac{2\pi}{3})} + \sin(x - \frac{2\pi}{3})}{12,6qG^c} + 12,2; \quad x = 0 \dots 2\pi; \quad G = 118,1; \quad c = 0,33; \quad q = 1,1$$

$$5.44. y = \frac{2,16 \cos(x - 2\pi/3)}{25qG^c} + 32,1c; \quad x = 0 \dots 2\pi; \quad c = 1,2; \quad G = 124,2; \quad q = 12,33$$

$$5.45. y = \frac{615 \sqrt{G - \sin(x - \frac{2\pi}{3})}}{16,2qc(G-3)} + 12; \quad x = 0 \dots 2\pi; \quad G = 76,2; \quad c = 11; \quad q = 2,2$$

ТЕМА 6. СТВОРЕННЯ ПРОГРАМ З ВИКОРИСТАННЯМ ПРОГРАМНИХ ОДИНИЦЬ

За індивідуальним завданням розробити чотири програми:

- 1) з використанням тільки списків параметрів;
- 2) з використанням тільки спільних блоків пам'яті;
- 3) з використанням модулів;
- 4) з використанням файлового інтерфейсу для обміну даними між

програмними одиницями.

В завданнях використовуються співвідношення:

$$x_1(2\alpha) = \frac{ch2\alpha + \sin 2\alpha}{sh2\alpha + \sin 2\alpha};$$

$$x_2(2\alpha) = \frac{ch2\alpha - \sin 2\alpha}{sh2\alpha + \sin 2\alpha};$$

$$x_3(2\alpha) = \frac{ch2\alpha - \cos 2\alpha}{sh2\alpha - \sin 2\alpha};$$

$$\alpha = \frac{\beta \ell}{2};$$

$$D = \frac{Eh^3}{12(1 - \mu^2)};$$

$$\phi(\beta x) = e^{-\beta x}(\cos \beta x + \sin \beta x);$$

$$\psi(\beta x) = e^{-\beta x}(\cos \beta x - \sin \beta x);$$

$$\theta(\beta x) = e^{-\beta x} \cos \beta x;$$

$$\xi(\beta x) = e^{-\beta x} \sin \beta x;$$

$$\beta = \left(\frac{3(1 - \mu^2)}{a^2 h^2} \right)^{1/4}.$$

Коефіцієнт Пуассона $\mu=0,3$; модуль пружності $E=2 \cdot 10^5$ МПа.

Індивідуальні завдання

6.1. Трубка теплообмінника $l = 0,6$ м, радіуса $a = 0,08$ м, товщиною $h = 0,0015$ м знаходиться під дією рівномірно розподіленого вигинаючого моменту $M_0 = 0,22$ Н·м та перерізуючої сили на торці $Q_0 = 8$ Н. Визначити переміщення W_x на напруження σ_x зовнішньої поверхні трубки у координатах по довжині трубки $x = (0 \dots l)$. Для обчислення поділити довжину l на 40 частин. Формули:

$$W_x = -\frac{1}{2\beta^2 D} [\beta M_0 \phi(\beta x) + Q_0 \theta(\beta x)]; \quad \sigma_x = \frac{6}{2\beta h^2} [2\beta M_0 \phi(\beta x) + 2Q_0 \xi(\beta x)].$$

Обчислення W_x, σ_x – виконати в підпрограмі; $\phi(\beta x), \theta(\beta x), \xi(\beta x)$ – обчислити в підпрограмах-функціях.

6.2. Трубчастий корпус реактора знаходиться під тиском внутрішнім реагенту $P = 18$ МПа. Діаметр корпусу $2a = 0,18$ м; довжина $l = 1,75$ м, товщина стінки $h = 0,00085$ м. На торцях корпусу виникає перерізуюча сила $Q_0 = 16$ Н. Визначити переміщення U та вигинаючий момент M у 30 перерізах, рівномірно розміщених по довжині l (поточна координата x). Формули:

$$U = -\frac{1}{2\beta^2 D} \left[\frac{P}{2\beta} \varphi(\beta x) - \frac{P}{\beta} \theta(\beta x) \right]; \quad M = \frac{1}{2\beta} \left[\frac{P}{\beta} \varphi(\beta x) - \frac{P}{\beta} \xi(\beta x) \right].$$

Змінні U та M – визначити в підпрограмі; Ψ , Θ , ξ , φ – оформити у вигляді функцій.

6.3. Коротка трубчаста обичайка довжиною $l = 0,18$ м, зовнішнім діаметром $2a = 0,16$ м, товщиною $h = 0,018$ м знаходиться під дією зовнішнього тиску $P = 12$ МПа. Визначити переміщення W стінок труби у 21 точці координати x , рівномірно розміщених по довжині l . Формули:

$$W = \frac{P \left(1 - \frac{\mu}{2} \right)}{\beta^3 D \left(\frac{h}{F} + \beta \left[\chi_1(2\alpha) - \frac{1}{2} \frac{\chi_2^2(2\alpha)}{\chi_3(2\alpha)} \right] \right)} \left(\frac{\sin \alpha sh \alpha}{\sin 2\alpha + sh 2\alpha} \sin \beta \chi sh \beta \chi + \frac{\cos \alpha ch \alpha}{\cos 2\alpha + ch 2\alpha} \cos \beta \chi ch \beta \chi \right);$$

$$F = \pi(a^2 - [a - h]^2).$$

χ_1, χ_2, χ_3 – визначити як функції; W – в підпрограмі.

6.4. Циліндричний перехідний елемент трубопроводу для транспортування метану довжиною $l=0,38$ м, діаметром $2a=0,2$ м, товщиною стінки $h=0,005$ м знаходиться під дією внутрішнього тиску $P=2,2$ МПа. Визначити переміщення W та навантаження Q в залежності від координати x довжини труби l . Розрахунок виконати у 38 точках по l . Формули:

$$W = -\frac{Pl^4}{64D\alpha^4} (1 - 2c_1 \cdot sh - 2c_2 \cdot ch); \quad Q = -\frac{Pl}{2\alpha} [c_1 (cs - cm) + c_2 (cs + cm)];$$

$$sh = \sin \beta x \cdot sh \beta x; \quad ch = \cos \beta x \cdot ch \beta x; \quad cs = \cos \beta x \cdot sh \beta x; \quad cm = ch \beta x \cdot \sin \beta x;$$

$$c_1 = \frac{\cos \alpha sh \alpha + ch \alpha \sin \alpha}{\sin 2\alpha + sh 2\alpha}; \quad c_2 = \frac{\cos \alpha ch \alpha - ch \alpha \sin \alpha}{\sin 2\alpha + sh 2\alpha}.$$

Величини sh , ch , cs , ct – визначити як функції. Для визначення c_1 , c_2 , β , α – скласти підпрограму.

6.5. Циліндрична труба знаходиться під дією зовнішнього надлишкового тиску $P = 20$ МПа. Розміри труби: радіус $a = 0,12$ м, товщина стінки $h = 0,01$ м. Визначити переміщення W , момент M_x та навантаження Q_x в перерізах на відстані $x = (0...l)$, де $l = 0,5$ м, з кроком $\Delta x = 0,012$ м. Формули:

$$W = \frac{P \cdot e^{-\beta x}}{8\beta^3 D} \varphi(\beta x); \quad M_x = -\frac{P}{4\beta^2} \psi(\beta x); \quad Q_x = \frac{P}{2} \theta(\beta x).$$

$\varphi(\beta x)$, $\psi(\beta x)$, $\theta(\beta x)$ – розробити у вигляді функцій; блок виводу значень оформити в підпрограмі.

6.6. Корпус випарної установки має вигляд сталюї циліндричної посудини діаметром $2a = 0,82$ м, висотою $l = 2,1$ м. Товщина стінки корпусу складає $h = 0,011$ м. Густина соляного розчину в установці $\rho = 1,3 \cdot 10^3$ кг/м³. Визначити переміщення W , момент M , силу, що діє по колу N , які розвиваються на відстані $x = (0...l)$ з кроком $\Delta x = 0,025$ м в корпусі випарної установки. Формули:

$$W = -\frac{\rho a^2 l}{Eh} \left[1 - \frac{x}{l} - \theta(\beta x) - \left(1 - \frac{1}{\beta l} \right) \xi(\beta x) \right]; \quad N = \rho a l \left[1 - \frac{x}{l} - \theta(\beta x) - \left(1 - \frac{1}{\beta l} \right) \xi(\beta x) \right];$$

$$M = \frac{\rho a l h}{\sqrt{12(1-\mu^2)}} \left[\xi(\beta x) - \left(1 - \frac{1}{\beta l} \right) \theta(\beta x) \right].$$

θ та ξ визначити як функції. W , N , M – в підпрограмі.

6.7. Трубопровід діаметром $2a = 0,8$ м підсилений стальними кільцями з кроком $l = 0,18$ м. Стінка трубопроводу – стальна, товщиною $h = 0,0038$ м. По трубопроводу перекачується нітробензол під тиском $P = 25$ МПа. Визначити силу N , діючу по колу трубопроводу між підсиленнями. Розрахунок виконати при $x = (0 \dots l)$ з кроком $0,005$ м. Формули:

$$N = -\frac{2}{\beta} \frac{P}{\frac{h}{F} + \beta \left[\chi_1(2\alpha) - \frac{1}{2} \frac{\chi_2^2(2\alpha)}{\chi_3(2\alpha)} \right]} \cdot \left(\frac{\sin \alpha sh \alpha}{\sin 2\alpha + sh 2\alpha} ck + \frac{\cos \alpha ch \alpha}{\sin 2\alpha + sh 2\alpha} sk \right);$$

$$ck = ch \beta x \cos \beta x; \quad sk = \sin \beta x sh \beta x; \quad F = \pi(a^2 - (a-h)^2)$$

Величини χ_1, χ_2, χ_3 визначити в підпрограмі, для визначення ck, sk організувати підпрограми-функції.

6.8. Сушильна установка має циліндричну частину діаметром $2a = 1,3$ м, довжину $l = 1,8$ м та товщину стінки $h = 0,0125$ м. Торці циліндричної частини шарнірно закріплені. Усередині установки розвивається тиск $P = 2,5$ МПа. Визначити переміщення U та момент M по довжині $x = (0 \dots l)$ циліндричної частини з кроком $\Delta x = 0,03$ м. Формули:

$$U = -\frac{Pl^4}{64D\alpha^4} (1 - 2c_1 sh - 2c_2 ch); \quad M = \frac{Pl^2}{4\alpha^2} (c_1 ch - c_2 sh); \quad ch = \cos \beta x ch \beta x;$$

$$sh = \sin \beta x sh \beta x; \quad c_1 = \frac{\sin \alpha sh \alpha}{\cos 2\alpha + ch 2\alpha}; \quad c_2 = \frac{\cos \alpha ch \alpha}{\cos 2\alpha + ch 2\alpha}.$$

Визначити в підпрограмі значення c_1 та c_2 , значення ch та sh визначити в підпрограмах-функціях.

6.9 Циліндрична цистерна довжиною $l = 3$ м, радіусом $a = 1,1$ м, товщиною стінки $h = 0,01$ м навантажена силами та моментами, відповідно, $Q_0 = 5,1 \cdot 10^3$ Н,

та $M_0 = 12,5$ Н·м, які рівномірно розподілені по торцях. Визначити момент M_x в залежності від координати $x = (0...l)$ по довжині l цистерни. Прийняти крок розрахунків $\Delta x = 0,125$ м. Формули:

$$M_x = 2 \frac{c_1}{s_0} \left[M_0(c_2 - s_1) - \frac{Q_0}{\beta} s_2 \right] + 2 \frac{s_3}{s_0} \left[M_0(s_1 - s_3) + \frac{Q}{\beta} c_3 \right];$$

$$c_1 = \cos \beta x \operatorname{sh} \beta x; \quad c_2 = \cos \alpha \operatorname{sh} \alpha;$$

$$c_3 = \cos \alpha \operatorname{ch} \alpha; \quad s_0 = \sin 2\alpha \operatorname{sh} 2\alpha;$$

$$s_1 = \sin \alpha \operatorname{ch} \alpha; \quad s_2 = \sin \alpha \operatorname{sh} \alpha;$$

$$s_3 = \sin \beta x \operatorname{sh} \beta x.$$

Для обчислення c_1, c_2, c_3 – передбачити зовнішні функції, s_0, s_1, s_2, s_3 – оформити у вигляді внутрішніх функцій.

6.10. Керамічні кільця довжиною $l=0,6$ м, радіусом $a=0,25$ м, товщиною $h=0,006$ м знаходяться у скрубєрі-охолоджувачі під дією рівномірно розподіленої по торцям перерізуючої сили $Q_0=8,2 \cdot 10^3$ Н. Модуль пружності $E_k=6 \cdot 10^4$ МПа, коефіцієнт Пуассона $\mu_k=0,2$. Визначити переміщення U та момент M , виникаючі в кільці на відстані x від краю ($x=0...l$). Розрахунок виконати з кроком $\Delta x=0,025$ м. Формули:

$$U = \frac{Q_0}{\beta^3 D} (c_1 s_1 + c_2 s_2); \quad M = -\frac{2Q_0}{\beta} (c_1 s_2 - c_2 s_1); \quad c_1 = \frac{\sin \alpha \operatorname{sh} \alpha}{\sin 2\alpha + \operatorname{sh} \alpha}; \quad c_2 = \frac{\cos \alpha \operatorname{ch} \alpha}{\sin 2\alpha + \operatorname{sh} 2\alpha};$$

$$s_1 = \sin \beta x \operatorname{sh} \beta x; \quad s_2 = \cos \beta x \operatorname{ch} \beta x.$$

Величини c_1, c_2, s_1, s_2 визначити як функції, U та M – розрахувати в підпрограмі.

6.11. Визначити прогин U та зусилля Q в корпусі млина, виконаного у вигляді полого циліндра з шарнірно закріпленими краями, якщо всередині корпуса діє тиск маси $P = 1,5$ МПа. Геометричні розміри: довжина $l = 2,8$ м,

радіус $a = 0,8$ м, товщина стінки $h = 0,0085$ м. Розрахунок виконати по довжині l з кроком $\Delta x = 0,1$ м. Формули:

$$U = \frac{Pl^4}{64Da^4}(1 - 2c_1s_1 - 2c_2c_3); \quad Q = -\frac{Pl}{2\alpha}[c_1(c_4 - s_2) - c_2(c_4 + s_2)]; \quad c_1 = \frac{\sin \alpha sh \alpha}{\cos 2\alpha + ch 2\alpha};$$

$$c_2 = \frac{\cos \alpha ch \alpha}{\cos 2\alpha + ch 2\alpha}; \quad c_3 = \cos \beta x ch \beta x; \quad c_4 = \cos \beta x sh \beta x; \quad s_1 = \sin \beta x sh \beta x; \quad s_2 = ch \beta x \sin \beta x.$$

Величини $c_1, c_2, c_3, c_4, s_1, s_2$ – визначити як функції, U та Q – визначити в підпрограмі.

6.12. Циклонний апарат довжиною $l = 1,2$ м, товщиною стінки $h = 0,005$ м та діаметром $2a = 0,5$ м знаходиться під дією внутрішнього тиску. Визначити прогин стінки W та момент M , що розвивається на відстані $x = 0,8$ м від торця, якщо внутрішній тиск змінюється від $P_{\min} = 0,1$ МПа до $P_{\max} = 3,1$ МПа з кроком $0,05$ МПа. Формули:

$$W = \frac{Pl^4}{64Da^4}(1 - 2c_1s_1 - 2c_2c_3); \quad M = \frac{Pl^2}{4\alpha^2}(c_1c_3 + c_2s_1);$$

$$c_1 = \frac{\cos \alpha sh \alpha - ch \alpha \sin \alpha}{\sin 2\alpha + sh 2\alpha}; \quad c_2 = \frac{\cos \alpha sh \alpha - \sin \alpha ch \alpha}{\sin 2\alpha + sh 2\alpha}.$$

s_1, c_3 – див. завдання № 6.11. Для визначення M та W скласти підпрограму, c_1, c_2, c_3, s_1 – визначити як підпрограми-функції.

6.13. Циліндричний адсорбер (довжина $l = 1$ м, діаметр $2a = 0,032$ м, товщина сталюї стінки $h = 0,009$ м) рівномірно навантажений торцевим моментом $M_0 = 12,6 \cdot 10^3$ Н·м. Визначити розподілення прогинів W та моментів M в корпусі адсорбера на відстані $x = (0 \dots l)$ від торцю з кроком $\Delta x = 0,05$ м. Формули:

$$W = -\frac{M_0}{\beta^2 D} (c_1 s_1 + c_2 s_2); \quad M = 2M_0 (c_1 s_2 + c_2 s_1);$$

$$c_1 = \frac{\cos \alpha \operatorname{sh} \alpha + \sin \alpha \operatorname{ch} \alpha}{\operatorname{sh} 2\alpha + \sin 2\alpha}; \quad c_2 = \frac{\cos \alpha \operatorname{sh} \alpha - \sin \alpha \operatorname{ch} \alpha}{\operatorname{sh} 2\alpha + \sin 2\alpha}; \quad s_1 = \sin \beta x \operatorname{sh} \beta x; \quad s_2 = \cos \beta x \operatorname{ch} \beta x.$$

c_1, c_2, s_1, s_2 – визначити в підпрограмах-функціях, W та M – в підпрограмі.

6.14. Визначити переміщення U стінки корпусу циліндричної сталльної оболонки під дією розподілених по торцю перерізуючих сил $Q_0 = 2,85 \cdot 10^3$ Н та моментів $M_0 = 35$ Н·м. Довжина оболонки: $l = 0,45$ м, діаметр $2a = 0,032$ м, товщина стінки $h = 0,028$ м. Розрахунок виконати з кроком $\Delta x = 0,001$ м по довжині $x = (0 \dots l)$. Формули:

$$U = \frac{1}{\beta^2 D} \{c_1 [Q_0 \beta s_1 - M_0 (s_2 + s_3)] + c_2 [Q_0 s_1 - M_0 (s_2 - s_4)]\}; \quad c_1 = \frac{\sin \beta x \operatorname{sh} \beta x}{\sin 2\alpha + \operatorname{sh} 2\alpha};$$

$$c_2 = \frac{\cos \beta x \operatorname{ch} \beta x}{\sin 2\alpha + \operatorname{sh} 2\alpha}; \quad s_1 = \sin \alpha \operatorname{sh} \alpha; \quad s_2 = \cos \alpha \operatorname{sh} \alpha; \quad s_3 = \sin \alpha \operatorname{ch} \alpha; \quad s_4 = \cos \alpha \operatorname{ch} \alpha.$$

c_1, c_2 – визначити у внутрішніх функціях, s_1, s_2, s_3, s_4 – визначити в підпрограмах-функціях.

6.15. Посилюючи кільця розміщені з кроком $l = 1$ м на сталній трубі діаметром $2a = 0,22$ м та товщиною стінки $h = 0,0042$ м. Визначити навантаження Q_x , виникаюче на координаті x тілу труби між посиленнями, тобто при $x = (0 \dots l)$ за умови тиску $P = 1,2$ МПа. Розрахунок виконати з кроком $\Delta x = 0,02$ м. Формули:

$$Q_x = -2 \frac{P(c_1 s_1 - c_2 s_2)}{\frac{h}{F} + \beta \left[\chi_1(2\alpha) - \frac{1}{2} \frac{\chi_2^2(2\alpha)}{\chi_3(2\alpha)} \right]}; \quad F = \pi(2ah + h^2); \quad s_2 = \operatorname{sh} \beta x \cos \beta x + \sin \beta x \operatorname{ch} \beta x$$

$$c_1 = \frac{\sin \alpha \operatorname{sh} \alpha}{\sin 2\alpha + \operatorname{sh} 2\alpha}; \quad c_2 = \frac{\cos \alpha \operatorname{ch} \alpha}{\sin 2\alpha + \operatorname{sh} 2\alpha}; \quad s_1 = \sin \beta x \operatorname{sh} \beta x - \cos \beta x \operatorname{ch} \beta x.$$

Значення Q_x визначити в підпрограмі, величини c_1, c_2, s_1, s_2 – визначити в підпрограмах-функціях.

6.16. Визначити прогин U та навантаження Q у трубчастій вставці теплообмінного контуру, навантаженого розподіленим моментом $M_0 = 11$ Н·м на торцях. Геометричні розміри вставки: довжина $l = 1,2$ м, радіус $a = 0,6$ м, товщина стінки $h = 0,0082$ м. Прогин U та навантаження Q подати у вигляді табличної залежності від координати x по довжині l вставки. Крок розрахунків $\Delta x = 0,05$ м. Формули:

$$U = -\frac{M_0}{\beta^2 D} (c_1 s_1 + c_2 s_2); \quad Q = 2M_0 \beta [c_1 (s_3 - s_4) - c_2 (s_3 + s_4)]; \quad c_1 = \frac{\cos \alpha sh \alpha + \sin \alpha ch \alpha}{\sin 2\alpha + sh 2\alpha};$$

$$c_2 = \frac{\cos \alpha sh \alpha - \sin \alpha ch \alpha}{\sin 2\alpha + sh 2\alpha}; \quad s_1 = \sin \beta x sh \beta x; \quad s_2 = \cos \beta x ch \beta x; \quad s_3 = \cos \beta x sh \beta x; \quad s_4 = \sin \beta x ch \beta x.$$

Значення c_1 та c_2 визначити в підпрограмах-функціях, значення U та Q – в підпрограмах.

6.17. Труба довжиною $l = 0,7$ м, радіусом $a = 0,12$ м, товщиною стінки $h = 0,002$ м знаходиться під дією рівномірно розподіленого вигинаючого моменту та перерізуючої сили на торці: $M_0 = 0,25$ Н·м, $Q_0 = 12$ Н. Визначити переміщення W_x на напруження N_x зовнішньої поверхні труби у координатах $x = (0 \dots l)$. Для обчислення поділити довжину l на 50 частин. Формули:

$$W_x = -\frac{1}{2\beta^2 D} [\beta M_0 \varphi(\beta x) + Q_0 \theta(\beta x)]; \quad N_x = \frac{6}{2\beta h^2} [2\beta M_0 \varphi(\beta x) + 2Q_0 \xi(\beta x)]$$

Обчислення W_x, N_x виконати в основній програмі, $\varphi(\beta x), \theta(\beta x), \xi(\beta x)$ обчислити в підпрограмах. Для виводу результатів розробити функцію.

6.18. Циліндричний подовжувач трубопроводу для транспортування етанолу довжиною $l = 0,2$ м, діаметром $2a = 0,12$ м, товщиною стінки $h = 0,0035$ м знаходиться під дією внутрішнього тиску $P = 3,2$ МПа. Визначити переміщення W та навантаження Q в залежності від координати x довжини труби l . Розрахунок виконати у 45 точках по довжині. Формули:

$$W = -\frac{Pl^4}{64D\alpha^4}(1 - 2c_1 \cdot sh - 2c_2 \cdot ch); \quad Q = -\frac{Pl}{2\alpha}[c_1(cs - cm) + c_2(cs + cm)];$$

$$sh = \sin \beta x \cdot sh \beta x; \quad ch = \cos \beta x \cdot ch \beta x; \quad cs = \cos \beta x \cdot sh \beta x; \quad cm = ch \beta x \cdot \sin \beta x;$$

$$c_1 = \frac{\cos \alpha sh \alpha + ch \alpha \sin \alpha}{\sin 2\alpha + sh 2\alpha}; \quad c_2 = \frac{\cos \alpha ch \alpha - ch \alpha \sin \alpha}{\sin 2\alpha + sh 2\alpha}.$$

Величини sh, ch, cs, cm – визначити як внутрішні функції. Для визначення c_1, c_2, β, α – скласти відповідні підпрограми.

6.19. Корпус сталевий синтез-колони має циліндричний вигляд діаметром $2a = 1,1$ м, висотою $l = 3,1$ м, товщиною стінки $h = 0,031$ м. Густина розчину в установці $\rho = 1,22 \cdot 10^3$ кг/м³. Визначити переміщення W , момент M , силу, діючу по колу, N , які розвиваються на відстані $x = (0 \dots l)$ з кроком $\Delta x = 0,02$ м в корпусі установки. Формули:

$$W = -\frac{\rho a^2 l}{Eh} \left[1 - \frac{x}{l} - \theta(\beta x) - \left(1 - \frac{1}{\beta l} \right) \xi(\beta x) \right]; \quad N = \rho a l \left[1 - \frac{x}{l} - \theta(\beta x) - \left(1 - \frac{1}{\beta l} \right) \xi(\beta x) \right];$$

$$M = \frac{\rho a l h}{\sqrt{12(1 - \mu^2)}} \left[\xi(\beta x) - \left(1 - \frac{1}{\beta l} \right) \theta(\beta x) \right].$$

θ та ξ визначити як внутрішні функції, W, N, M – в підпрограмах. Вивести результати за допомогою функції.

6.20. Автоклав має циліндричну частину діаметром $2a = 1,25$ м, довжиною $l = 1,45$ м, товщиною $h = 0,015$ м. Торці циліндричної частини шарнірно

закріплені. Усередині установки розвивається тиск $P = 4,5$ МПа. Визначити переміщення U та момент M по довжині циліндричної частини з кроком $\Delta x = 0,05$ м, $x = (0 \dots l)$. Формули:

$$U = -\frac{Pl^4}{64D\alpha^4}(1 - 2c_1sh - 2c_2ch); \quad M = \frac{Pl^2}{4\alpha^2}(c_1ch - c_2sh); \quad ch = \cos \beta x ch \beta x;$$

$$sh = \sin \beta x sh \beta x; \quad c_1 = \frac{\sin \alpha sh \alpha}{\cos 2\alpha + ch 2\alpha}; \quad c_2 = \frac{\cos \alpha ch \alpha}{\cos 2\alpha + ch 2\alpha}.$$

Визначити в підпрограмі переміщення U та момент M , значення c_1 та c_2 , визначити во внутрішніх функціях, а значення ch та sh – визначити в підпрограмах-функціях.

6.21. Керамічні кільцеві опори довжиною $l = 0,3$ м, радіусом $a = 0,15$ м, товщиною $h = 0,004$ м знаходяться під дією рівномірно розподіленої по торцям перерізуючої сили $Q_0 = 6,4 \cdot 10^3$ Н. Модуль пружності $E_k = 6 \cdot 10^4$ МПа, коефіцієнт Пуассона $\mu_k = 0,2$. Визначити переміщення U та момент M , які виникають відстані x від краю: $x = (0 \dots l)$. Розрахунок виконати з кроком $\Delta x = 0,05$ м. Формули:

$$U = \frac{Q_0}{\beta^3 D}(c_1 s_1 + c_2 s_2); \quad M = -\frac{2Q_0}{\beta}(c_1 s_2 - c_2 s_1); \quad c_1 = \frac{\sin \alpha sh \alpha}{\sin 2\alpha + sh 2\alpha}; \quad c_2 = \frac{\cos \alpha ch \alpha}{\sin 2\alpha + sh 2\alpha};$$

$$s_1 = \sin \beta x sh \beta x; \quad s_2 = \cos \beta x ch \beta x.$$

Величини c_1 , c_2 , s_1 , s_2 – визначити як функції, U та M – розрахувати в основній програмі, блок виводу результатів розробити як підпрограму.

6.22. Ресивер довжиною $l = 1,4$ м, товщиною стінки $h = 0,008$ м та діаметром $2a = 0,55$ м знаходиться під дією внутрішнього тиску P . Визначити прогин стінки W та момент M , що розвивається на відстані $x = 0,4$ м від торця,

якщо внутрішній тиск змінюється від $P_{\min} = 0,01$ МПа до $P_{\max} = 2$ МПа з кроком 0,01 МПа. Формули:

$$W = \frac{Pl^4}{64Dl^4}(1 - 2c_1s_1 - 2c_2c_3); \quad M = \frac{Pl^4}{4\alpha^2}(c_1c_3 + c_2s_1);$$

$$c_1 = \frac{\cos\alpha sh\alpha - ch\alpha \sin\alpha}{\sin 2\alpha + sh2\alpha}; \quad c_2 = \frac{\cos\alpha sh\alpha - \sin\alpha ch\alpha}{\sin 2\alpha + sh2\alpha}.$$

s_1, c_3 – див. завдання № 11. Для визначення M та W скласти підпрограми-функції, c_1, c_2, c_3, s_1 – визначити як внутрішні функції.

6.23. Визначити переміщення U , виникаюче в корпусі циліндричної сталевій оболонки під дією розподілених по торцю перерізуючих сил $Q_0 = 1,35 \cdot 10^3$ Н та моментів $M_0 = 62$ Н·м. Розміри оболонки: довжина $l = 0,52$ м, діаметр $2a = 0,044$ м, товщина стінки $h = 0,026$ м. Розрахунок виконати з кроком $\Delta x = 0,005$ м по координаті $x = (0 \dots l)$. Формули:

$$U = \frac{1}{\beta^2 D} \{c_1[Q_0\beta s_1 - M_0(s_2 + s_3)] + c_2[Q_0s_1 - M_0(s_2 - s_4)]\}; \quad c_1 = \frac{\sin \beta x sh \beta x}{\sin 2\alpha + sh 2\alpha};$$

$$c_2 = \frac{\cos \beta x ch \beta x}{\sin 2\alpha + sh 2\alpha}; \quad s_1 = \sin \alpha sh \alpha; \quad s_2 = \cos \alpha sh \alpha; \quad s_3 = \sin \alpha ch \alpha; \quad s_4 = \cos \alpha ch \alpha.$$

c_1, c_2 – визначити у внутрішніх функціях, s_1, s_2, s_3, s_4 – визначити в зовнішніх функціях. Для виводу результатів застосувати підпрограму.

6.24. Визначити прогин U та навантаження Q у трубчастій вставці реактору, навантаженого по торцях розподіленим моментом $M_0 = 17,2$ Н·м. Геометричні розміри вставки: довжина $l = 1,25$ м, радіус $a = 0,6$ м, товщина стінки $h = 0,0065$ м. Прогин U та навантаження Q подати у вигляді табличної залежності від координати x по довжині l вставки з кроком $\Delta x = 0,05$ м. Формули:

$$U = -\frac{M_0}{\beta^2 D} (c_1 s_1 + c_2 s_2); \quad Q = 2M_0 \beta [c_1 (s_3 - s_4) - c_2 (s_3 + s_4)]; \quad c_1 = \frac{\cos \alpha \operatorname{sh} \alpha + \sin \alpha \operatorname{ch} \alpha}{\sin 2\alpha + \operatorname{sh} 2\alpha};$$

$$c_2 = \frac{\cos \alpha \operatorname{sh} \alpha - \sin \alpha \operatorname{ch} \alpha}{\sin 2\alpha + \operatorname{sh} 2\alpha}; \quad s_1 = \sin \beta x \operatorname{sh} \beta x; \quad s_2 = \cos \beta x \operatorname{ch} \beta x; \quad s_3 = \cos \beta x \operatorname{sh} \beta x; \quad s_4 = \sin \beta x \operatorname{ch} \beta x.$$

Значення c_1 та c_2 визначити в підпрограмах-функціях, значення U та Q – в підпрограмах. Значення s_1, s_2, s_3, s_4 – визначити у внутрішніх функціях.

ТЕМА 7. РОЗВ'ЯЗАННЯ ДИФЕРЕНЦІАЛЬНИХ МОДЕЛЕЙ НА БАЗІ ЗВИЧАЙНИХ ДИФЕРЕНЦІАЛЬНИХ РІВНЯНЬ

7.1. Згідно до завдання (табл. 1) скласти диференціальну модель, її дискретний аналог за методом Ейлера для визначення температури об'єкту T в залежності від часу t та отримати її розв'язок, якщо відомі: K – коефіцієнт швидкості теплопередачі; T_0 – початкова температура об'єкту; $T_{cp}(t)$ – закон зміни температури оточуючого середовища в часі, t_{max} – час спостереження.

7.2. Згідно до завдання (табл. 2) скласти диференціальну модель, її дискретний аналог за методом Рунге-Кутта для визначення кількості речовини C , одержуваної у будь-який момент часу $t > 0$ у реакції двох вихідних речовин A та B , кількістю (у початковий момент часу) a та b , відповідно. c_0 – кількість речовини C , що одержане у будь-який час t_0 . Врахувати, що з α кількості речовини A і β кількості речовини B виходить $\alpha + \beta = \chi$ речовини C . Отримати таблицю шуканих значень. Розрахунок провести при зменшенні кроку дискретизації. Відшукати граничне значення кроку для отримання стійкого рішення. Побудувати графіки шуканих величин та зробити висновки про збіжність отриманих результатів розрахунків.

Таблиця 1. Завдання для визначення температури об'єкту

№	$T_{cp}(t)$	t_{max}	T_o	K
1	$1,4+0,3t^2$	22	36	0,24/0,48/0,72
2	$28-2t$	10	40	0,25/0,38/0,8
3	$3,2+2,1t$	14	28	0,1/0,3/0,66
4	$2+1,8t$	12	38	0,22/0,4/0,78
5	$25-0,24t^2$	10	41	0,12/0,33/0,77
6	$26,2-0,31t^2$	9	32	0,2/0,44/0,8
7	$2+0,18t^2$	10	35	0,12/0,24/0,75
8	$1,87+0,21t^2$	9	38	0,16/0,45/0,81
9	$30,22-0,031t^3$	9,2	44	0,11/0,54/0,76
10	$3,21+0,015t^3$	8,3	39,9	0,12/0,34/0,87
11	$30-6(t+2)^{1/2}$	12	40,1	0,14/0,4/0,75
12	$28,6-4t^{1/2}$	17	33,2	0,17/0,33/0,68
13	$2,2+6,3t^{1/2}$	11	34,8	0,14/0,43/0,81
14	$2,68+7,2(t+4)^{1/2}$	15,3	42	0,16/0,44/0,9
15	$28,7-4,12(t+1,2)^{1/2}$	12,	34	0,14/0,39/0,87
16	$1,4+0,3t^2$	23	34	0,28/0,4/0,78
17	$28-2t$	12	45	0,22/0,36/0,82
18	$3,2+2,1t$	13	34	0,14/0,33/0,63
19	$2+1,8t$	11	44	0,21/0,41/0,71
20	$25,7-0,22t^2$	7	22	0,14/0,32/0,75
21	$26,9-0,36t^2$	2,5	52	0,21/0,4/0,81
22	$2,1+0,17t^2$	7	44	0,13/0,25/0,76
23	$1,87+0,241t^2$	5	17	0,17/0,46/0,84
24	$30,2-0,0321t^3$	6	12	0,13/0,53/0,77
25	$3,26+0,0115t^3$	7,3	77	0,15/0,32/0,84
26	$30-6/13(t+2)^{1/2}$	12,5	51	0,13/0,41/0,76
27	$27,6-7/6t^{1/2}$	17,8	40	0,17/0,32/0,69
28	$2,23+7,3(t/2)^{1/2}$	11,6	12	0,14/0,43/0,81
29	$2,8+7,1(3t+4)^{1/2}$	12,3	6	0,146/0,4/0,92
30	$29,7-4,12t(2t+0,2)$	12,1	8	0,11/0,4/0,79
31	$30,2-0,0321t^3$	5,6	12	0,12/0,55/0,99
32	$3,26+0,0115t^3$	5,7	3	0,14/0,3/0,81
33	$30-6t(t+2)/13$	18	55	0,12/0,4/0,75
34	$27,6-7t^{1/2}/6$	15	45	0,13/0,3/0,72
35	$2,23+7,3(t/2)^{1/2}$	13,6	5	0,1/0,3/0,84
36	$2,8+7,1(3t+4)^{1/2}$	11,3	3	0,16/0,4/0,93
37	$29,7-4,12(2t+0,2)^{1/2}$	10,1	0	0,12/0,3/0,9
38	$31,2-0,0321t^3$	6,2	11	0,11/0,5/0,7
39	$3,2+0,011t^2$	7,0	73	0,17/0,35/0,8
40	$30,6-0,6(t+1,6)^{1/2}$	12,2	53	0,12/0,4/0,75

Таблиця 2. Завдання для визначення кількості речовини в реакції

№	Реакція в'яжучого в надлишку води $K(t)$	Час спостереження	Речовина			
			B		C	
			b	β	χ	c_0
1	$248t$	10	8	1	6	1
2	$6\exp(t)$	1,2	10	1	6	2
3	$3t^2+t$	9,7	9	1	8	2
4	$22,2t$	12	6	1	5	1
5	$2+\exp(2t)$	1,2	12	1	8	2
6	$12t+3,2$	5	7	1	6	1
7	t^2+t	1,6	6	1	6	1
8	$2t+11,2$	7	7	1	8	1
9	$24t^3+1$	1,3	11	1	8	2
10	$17t+1,6$	8,3	8	1	5	1
11	$1,2t^2+0,3t$	3,3	6	1	5	1
12	$2,2\exp(t)$	1,7	7	1	8	2
13	$1,3\exp(t)$	2,1	10	1	8	1
14	$8t+4$	6	6	1	6	1
15	$73,3-0,2t$	12	8	1	6	1
16	$248+t$	10	8	1	6	1
17	$2\exp(t)$	1,2	10	1	6	2
18	$3t+t^2$	9,7	9	1	8	2
19	$22,2t+6$	12	6	1	5	1
20	$2+\exp(2,2t)$	1,2	12	1	8	2
21	$12+3,2t$	5	7	1	6	1
22	$t^2+0,8t$	1,6	6	1	6	1
23	$2t+12$	7	7	1	8	1
24	$2t^2+t+1$	1,3	11	1	8	2
25	$12t+1,3$	8,3	8	1	5	1
26	$1,1t^2+0,25t$	3,3	6	1	5	1
27	$2,7\exp(t)$	1,7	7	1	8	2
28	$1,8\exp(t)$	2,1	10	1	8	1
29	$4(t+1)$	6	6	1	6	1
30	$63,2-0,12t$	12	8	1	6	1
31	$2,4+\exp(2,1t)$	1,2	12	1	8	2
32	$11+2t$	5	7	1	6	1
33	$t^2+0,8t$	1,5	6	1	6	1
34	$2,6t+10$	7	7	1	8	1
35	t^2+t+3	1,3	11	1	8	2
36	$2t+13$	8,3	8	1	5	1
37	$1,6t^2+0,2t$	3,3	6	1	5	1
38	$2\exp(1,6t)$	1,7	7	1	8	2
39	$1,3\exp(t)$	2,1	10	1	8	1
40	$5(t+3)$	6	6	1	6	1

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ ТА ЕЛЕКТРОННИХ РЕСУРСІВ

1. Програмне забезпечення інженерних розрахунків. Лабораторний практикум [Електронний ресурс] : навчальний посібник для підготовки бакалаврів, які навчаються за спеціальністю 133 – «Галузеве машинобудування», за освітньою програмою «Комп'ютерно-інтегровані технології проектування обладнання хімічної інженерії» / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: Д. Е. Сідоров, І. О. Казак. – Електронні текстові дані (1 файл: 3,24 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 166 с. Доступ: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/50647>
2. Програмне забезпечення інженерних розрахунків. Лекції [Електронний ресурс] : навчальний посібник для підготовки бакалаврів, які навчаються за спеціальністю 133 – «Галузеве машинобудування», освітньою програмою «Комп'ютерно-інтегровані технології проектування обладнання хімічної інженерії» / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: Д. Е. Сідоров, І. О. Казак. – Електронні текстові дані (1 файл: 3,78 М байт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 244 с. Доступ: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/50645>
3. Інженерні розрахунки на ПЕОМ: Завдання для самостійного розв'язання. Навч. посіб. для підготовки бакалаврів за спеціальностями 131 – Прикладна механіка, 133 – Галузеве машинобудування / Уклад.: Д.Е. Сідоров, І.О. Казак. – Київ: КПІ ім. І. Сікорського, 2019. – 99 с. Доступ: <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/27600>
4. Інженерні розрахунки на ПЕОМ. Частина 1. Програмування. Лабораторний практикум з освітнього компоненту: навч. посіб. для підготовки бакалаврів денної форми навчання за спеціальністю 133 – Галузеве машинобудування / Уклад. Д.Е. Сідоров, І.О. Казак, І.І. Івіцький. – Київ: КПІ ім. І. Сікорського, 2018. – 66 с. Доступ: <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/25145>

5. Інженерні розрахунки на ПЕОМ. Частина 2. Процедурне програмування. Лабораторний практикум з освітнього компоненту: навч. посіб. для підготовки бакалаврів денної форми навчання за спеціальністю 133 – Галузеве машинобудування / Уклад. Д.Е. Сідоров, І.О. Казак, І.І. Івіцький. – Київ: КПІ ім. І. Сікорського, 2018. – 38 с. Доступ: <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/25146>

6. Д.Е. Сідоров, І.О. Казак. Основи інженерних розрахунків на ПЕОМ. Програмування алгоритмічною мовою ФОРТРАН. – К: Центр учбової літератури, 2016. – 185 с. - ISBN 978-966-97466-7-2

Основні освітні портали

1. Fortran-lang.org (Learn): Офіційний сайт спільноти Modern Fortran. <https://fortran-lang.org/learn/>
2. Exercism (Fortran Track): Безкоштовна платформа для практичного навчання. <https://exercism.org/tracks/fortran>

Онлайн-курси (відео та сертифікації)

1. edX: Fortran for Scientific Programming: Курс від Левенського католицького університету (KU Leuven). <https://www.edx.org/learn/computer-science/ku-leuven-fortran-for-scientific-programming>
2. LinkedIn Learning: Introduction to Fortran: Відеокурс тривалістю близько 2.5 годин. <https://www.linkedin.com/learning/topics/fortran>

Спеціалізовані довідники

1. Fortran Wiki. <https://fortranwiki.org/fortran/show/HomePage>
2. TutorialsPoint: Fortran Tutorial. https://www.tutorialspoint.com/fortran/fortran_tutorial.pdf
3. Rosetta Stone (Python/Fortran). https://fortran-lang.org/learn/rosetta_stone/

Електронне мережне навчальне видання

Сідоров Дмитро Едуардович
Казак Ірина Олександрівна

ІНЖЕНЕРНІ РОЗРАХУНКИ НА ПЕОМ

Завдання самостійного розв’язання

для підготовки бакалаврів денної форми навчання за освітніми програмами «Інжиніринг паковань та пакувального обладнання, Інжиніринг обладнання виробництва полімерних та будівельних матеріалів і виробів»

Комп’ютерна правка та верстка – *авторські*