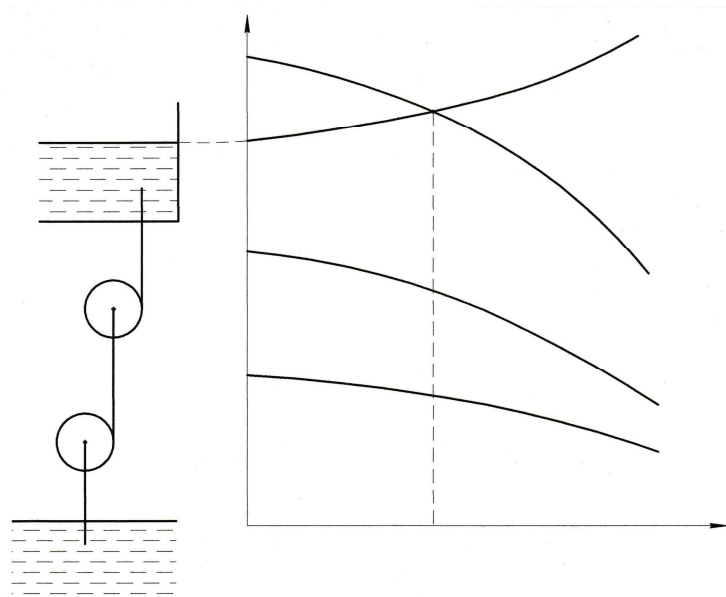


О. В. НАХАЙЧУК, В. І. МУЗИЧУК

ЗАДАЧНИК З ГІДРАВЛІКИ ТА ТЕПЛОТЕХНІКИ



УДК 626.8(075.3)

Нахайчук О.В., Музичук В.І. Задачник з гідравліки та теплотехніки.
Навчальний посібник. – Вінниця: ВНАУ, 2012 – 123 с.

Рекомендовано до видання методичною радою Вінницького національного аграрного університету, протокол № від 28 травня 2012 р.

Навчальний посібник призначений для практичних занять з гідравліки та теплотехніки. Наведені приклади рішень задач по кожному із розділів. В кожній задачі показаний порядок розрахунку, розв'язок виконаний в конкретних числових величинах, розрахунки супроводжуються необхідними схемами і рисунками. В посібнику приведені короткі теоретичні відомості та необхідні довідникові дані.

Для студентів механічних спеціальностей вузів, які навчаються за програмами бакалавра, інженера-спеціаліста та магістра.

Іл.: 28. Таб.: 10. Бібліогр. 11 назв.

Рецензенти:

Сивак І.О. д.т.н., професор (Вінницький національний
технічний університет)

Паламарчук І.П. д.т.н., професор (Вінницький національний
аграрний університет)

УДК УДК 626.8(075.3)

ISBN

© Нахайчук О.В., Музичук В.І. 2012

ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
I. РОЗДІЛ 1. ГІДРАВЛІКА.....	8
1. Основні фізичні властивості рідин	8
2. Гідростатичний тиск. Основне рівняння гідростатики	11
3. Визначення сили тиску рідини на занурені тіла та точки її прикладання	18
4. Основи теорії плавання	27
5. Рівняння Д. Бернуллі	29
6. Визначення режимів руху рідини. Критичне значення числа Рейнольдса	38
7. Визначення загальних втрат напору при русі рідини в простому трубопроводі	43
8. Витікання рідини через насадки і короткі трубопроводи при постійному напорі	47
9. Розрахунок довгих трубопроводів	52
10. Розрахунок насосної установки	58
11. Розрахунок трубопроводів при наявності гідравлічного удару . .	66
II. РОЗДІЛ 2. ТЕПЛОТЕХНІКА.....	71
1. Технічна термодинаміка.	71
2. Ідеальні гази і їх закони	77
3. Теплоємність газів	79
4. Перший закон термодинаміки.. . . .	80
5. Термодинамічні процеси	82
6. Процеси пароутворення.	84
7. Вологе повітря	86
8. Двигуни внутрішнього згорання, ГТУ і компресори.	87
9. Теплопровідність	93
10. Конвективний теплообмін.	97
11. Променистий теплообмін	102
12. Теплообмінні апарати.	105
13. Паливо та основи теорії горіння.	110
14. Котельні установки, тепло генератори, водонагрівачі	110
15. Теплопостачання	111
16. Сушіння с/г продукції.	111
ЛІТЕРАТУРА	112
ЛІТЕРАТУРА	118
ДОДАТКИ	113

ВСТУП

Загальнотехнічні дисципліни “Гідравліка” та “Теплотехніка” є основою для подальшого вивчення таких дисциплін та курсів як гідропривід сільськогосподарських машин, технічна гідромеханіка, сільськогосподарське водопостачання, меліорація, трактори і автомобілі та багато інших, тому особливого значення набуває надання майбутнім фахівцям знань з основ теорії та розрахунку гідростатичних, гідродинамічних та теплотехнічних систем, навчення їх інженерним методам рішення задач.

Актуальність рукопису полягає в тому, що студенти за допомогою навчального посібника зможуть досконало оволодіти сучасними методами розрахунку елементів гідроприводів сільськогосподарських та інших машин, коротких та довгих трубопроводів, проектування різних теплотехнічних машин та пристроїв.

Необхідність видання даного навчального посібника викликана недостатньою кількістю задачників з даних дисциплін, та їх видань українською мовою.

Підготовка до практичних занять і самостійне рішення характерних типових задач служить визначальній меті – отриманню стійких навиків щодо вирішення конкретних задач з різних розділів курсу. В процесі їх придбання відпрацьовується можливість застосування загальних теоретичних закономірностей до окремих конкретних практичних задач, що сприяє глибшому розумінню суті дисципліни, яка вивчається.

Під час аудиторних практичних занять рекомендується рішення 3 - 4 задач за зростаючою складністю, потім видати задачі для самостійного позааудиторного рішення. Рішення задач неможливе без знання теоретичного матеріалу і спеціальних методичних прийомів, загальних принципів для групи задач. Таким чином, самостійному розв’язку задач повинна передувати робота по ретельному вивченню теоретичного лекційного матеріалу відповідних розділів гідравліки та теплотехніки.

При рішенні задач необхідно слідувати таким правилам методичного характеру:

- записати коротку умову задачі, перевіривши в систему СІ всі відомі з умови дані, додавши, у разі потреби, деякі довідкові константи;
- виконати аналіз задачі, розкривши логічний шлях пошуку невідомої величини з відображенням всіх необхідних закономірностей, які використовуються в процесі рішення;
- виконати графічне зображення (ескіз) умови задачі;
- одержати рішення у вигляді залежності в загальному вигляді, супроводжуючи необхідними поясненнями;
- оцінити достовірність рішення, перевіривши розмірності і повне використання початкових даних;
- розробити чисельний розрахунок з врахуванням необхідної точності рішення;

Контроль і оцінка якості виконання студентами самостійної роботи на лабораторно-практичних заняттях здійснюється:

- опитуванням теоретичних положень з оцінкою якості засвоєних знань;
- перевіркою виконання домашніх завдань;
- проведенням контрольних робіт.

В якості основних підручників рекомендуються [1, 2, 3, 4], які є в достатній кількості.

У кінці навчального посібника дані додатки, основні позначення, список літератури.

Короткий історичний опис розвитку дисциплін:

Гідравліка - наука, що вивчає закони рівноваги і руху рідини, а також методи практичного застосування цих законів. Закони гідравліки використовуються при проектуванні і будівництві гідротехнічних споруд, гідравлічних машин, розрахунку трубопроводів і т. д. Перші, дуже важливі результати досліджень в області гідравліки пов'язані з ім'ям давньогрецького вченого Архімеда (287-212 рр.. до н.е.), що відкрив закон про рівновагу тіла, зануреного в рідину. Однак після Архімеда протягом майже 1700 років гідравліка не отримала помітного розвитку. Новий етап у розвитку гідравліки настав в епоху відродження. Тут слід зазначити роботи голландського вченого Стевіна (1548-1620 рр..), який сформулював правила визначення сили тиску на дно і стінки посудин; італійського вченого Торрічеллі (1608-1647 рр..), що досліджував властивості течії рідини і відкрив закон витікання рідини з отвору в посудині; французького математика і фізика Паскаля (1623-1662 рр..), який сформулював закон про передачу рідиною тиску, що діє на її поверхню. У XVII-XVIII ст. були встановлені найважливіші закони гідромеханіки. Закони механіки, відкриті І. Ньютоном (1643 - 1727 рр..), створили необхідну базу для вивчення законів руху рідин. І. Ньютон розробив основи теорії внутрішнього тертя рідин, яку надалі розвивали його послідовники, у тому числі російський вчений Н. П. Петров (1836-1920 рр..). Дана теорія отримала назву гідродинамічної теорії мастил. Великі вчені - Леонард Ейлер (1707-1783 рр..) і Даниїл Бернуллі (1700-1782 рр..) встановили основні закони і вивели найважливіші рівняння гідромеханіки. Слід, однак, відзначити, що рівняння Бернуллі і Ейлера носять головним чином теоретичний характер і відносяться до ідеальної рідини. У XIX в., в період бурхливого розвитку техніки, гідравліка розвивається головним чином як прикладна наука, яка будує свої висновки на основі розгляду спрощених схем гідравлічних явищ. В ході відповідних експериментів в теоретичні рівняння гідромеханіки були введені емпіричні поправочні коефіцієнти (роботи Дарсі, Вейсбаха та ін.) Кінець XIX і початок XX ст. ознаменовані формуванням і встановленням закономірності руху рідин. Важливу роль зіграли праці англійського гідромеханіка О. Рейнольдса (1842-1912 рр..), який встановив закономірності ламінарного і турбулентного характеру руху рідини, роботи Н. Е. Жуковського (1847-1921 рр..) в різних областях гідромеханіки. Завдяки роботам І. Прандтля (1875-1953 рр..) в області гідродинаміки гідравліка як наука XX ст. перетворилася на галузь знань, в якій теорія і досвід тісно пов'язані і взаємно збагачують одна

одну. У розвиток сучасної гідравліки великий вклад внесли вчені: В.Г. Шухов, А.Н. Крилов, Н.Н. Павловський, І.І. Агроскін, В.Д. Альшуль, Л.Г. Лойцянский, А.А. Угінчус та ін.

Загальна теплотехніка займається вивченням законів перетворення хімічної енергії палива в теплоту, механічну роботу і електричну енергію, а також властивостей робочих речовин, конструкцій машин і апаратів, що застосовуються в енергетичних установках. Теоретичні основи теплотехніки розроблені М.В. Ломоносовим (1711-1765 рр.), який сформулював в середині XVIII ст. закон збереження матерії. М.В. Ломоносов відкинув пануючу в той час «теорію теплорода», протиставивши їй справді наукову теорію, згідно якої теплота є результатом внутрішнього руху найдрібніших частинок речовини. Надалі дослідження Майєра (1814-1878 рр.), Джоуля (1818 - 1889 рр.), Гельмгольца (1821-1894 рр.) та інших вчених поглибили знання закону збереження енергії. Французький вчений С. Карно (1796-1832) обґрунтовував, що всюди, де виконується механічна робота, виникає теплота. Велика заслуга в розвитку теоретичних основ теплотехніки належить російським ученим: М.Ф. Окатову, І. А. Вишнеградському, Д.І. Менделєєву. Важливі дослідження з питань теплообміну провели А.Г. Столетов, М.В. Кірпічов, А.А. Гухман, М.А. Міхєєв, А.В. Ликов та ін. У вивчення властивостей реальних газів і водяної пари великий вклад внесли М.П. Вукалович, І.І. Новіков, В.А. Кирилін та ін

Початок розвитку практичного напрямку теплоенергетики було покладено російським винахідником І.І. Ползуновим, який побудував в 1775 р. першу парову машину, що ознаменувало собою перехід до виробництва і застосування теплових двигунів. Аналогічну машину трохи пізніше побудував в Англії Джеймс Уатт. Подальші роботи привели до створення поршневих двигунів внутрішнього згоряння і парових турбін. До XX ст. теплові двигуни використовувалися як джерела механічної роботи для безпосереднього приводу в дію робочих органів машин і агрегатів. Енергію теплових двигунів неможливо було передати на велику відстань - від місця виробництва до місця її споживання. Ця проблема була вирішена з винаходом електричних машин (електрогенераторів і електродвигунів), що перетворюють механічну роботу в електричну енергію, а електричну енергію в механічну роботу. У Росії перша електростанція потужністю 505 кВт була побудована під Петроградом. Видатним досягненням вітчизняної енергетики було спорудження в 1918 р. російським інженером Р.І. Класоном першою в світі електростанції, що працювала на торфі. Після Великої Жовтневої соціалістичної революції набула широко розвитку промислова енергетика. Вона стала основою розвитку енергетики в нашій країні, ця галузь народного господарства безперервно розвивається.

Відмінною особливістю сучасних теплових електростанцій є концентрація енергетичної потужності на одній електростанції. Надалі також передбачено будівництво теплових електростанцій потужністю 4000-6000 МВт з енергетичними блоками, які складаються з котлів, парових турбін і електрогенераторів потужністю 500, 800, 1000 і 1500 МВт.

Сучасний розвиток промисловості пов'язаний зі збільшенням споживання електричної енергії, що вимагає різкого збільшення видобутку природного палива. В зв'язку з цим, особлива увага приділяється більш широкому використанню для виробництва електроенергії дешевого вугілля Донбаського родовища. Однак запаси природного палива обмежені, тому завдання полягає в найбільш ефективному його використанні, і, зокрема, у збільшенні ККД процесів перетворення теплоти в електричну енергію. На сучасних теплоелектростанціях енергія природного палива перетворюється безпосередньо в електричну, минаючи прийняті на турбінних електростанціях стадії перетворення хімічної енергії природного палива в теплоту, теплоти - в механічну роботу, а останньої - в електричну енергію. Такий метод виробництва електроенергії дозволяє збільшити ККД електростанції більш ніж на 30% в порівнянні з ККД турбінних електростанцій. У районах, віддалених від запасів природного палива, йде будівництво атомних електростанцій (АЕС). Важливе значення для енергетики країни мають гідравлічні електростанції (ГЕС). На частку ГЕС приходиться близько 20% усієї вироблюваної в нашій країні електроенергії, при цьому заощаджується велика кількість природного палива.

В Україні побудовані гідроакumuлюючі електростанції (ГАЕС): Київська потужністю 225 МВт і Загорська потужністю 1200 МВт. На цих станціях встановлені так звані оборотні гідротурбіни, здатні в період максимального навантаження працювати в режимі звичайних турбін і виробляють електроенергію, а в період мінімального навантаження - в режимі насосів (виконується перекачування води з водойми після греблі назад в водосховище. Важливо, що при цьому вдається зберегти великі земельні масиви, придатні для вирощування сільськогосподарських культур, які при будівництві великих ГЕС часто затоплювалися. На сучасному етапі розвитку енергетики ведуться роботи по використанню інших джерел енергії - теплоти геотермальних вод, енергії морських припливів.

Великі надії на вирішення проблем енергетичних джерел покладаються на дослідження і у нас, і за кордоном роботи по здійсненню керованих реакцій синтезу ядер гелію з ядрами дейтерію і тритію, при яких виділяється величезна кількість енергії. «Сировинним» джерелом для цих реакцій може служити вода, запаси якої в природі практично необмежені.

РОЗДІЛ І. ГІДРАВЛІКА

1. Основні фізичні властивості рідин

Задача № 1.1. Питома вага бензину $\gamma = 7063 \text{ Н/м}^3$. Визначити густину.

Рішення: $\rho = \gamma/g$; $\rho = 7063/9,81 = 720 \text{ кг/м}^3$.

Задача № 1.2. Густина дизельного мазуту $\rho = 878 \text{ кг/м}^3$. Визначити питому вагу.

Рішення: $\gamma = \rho \times g$; $\gamma = 878 \times 9,81 = 8613 \text{ Н/м}^3$.

Задача № 1.3. Мідний шар діаметром $d = 100 \text{ мм}$ має вагу в повітрі $G_1 = 45,7 \text{ Н}$, а при зануренні в рідину $G_2 = 40,6 \text{ Н}$. Визначити густину рідини.

Рішення: Визначимо вагу G_p та об'єм V_p витісненої рідини

$$G_p = G_1 - G_2; G_p = 45,7 - 40,6 = 5,1 \text{ Н.}$$

$$V_p = \pi \times d^3 / 6 = 3,14 \times 0,1^3 / 6 = 0,523 \times 10^{-3} \text{ м}^3.$$

$$\text{Тоді значення густини можна визначити як: } \rho = \frac{G}{g \times V} = \frac{5,1}{9,81 \times 0,523 \times 10^{-3}} = 994 \text{ кг/м}^3.$$

Задача № 1.4. Трубопровід діаметром $d = 500 \text{ мм}$ довжиною $L = 1000 \text{ м}$ наповнений водою при тиску $p_1 = 400 \text{ кПа}$, температура води $5 \text{ }^\circ\text{C}$. Визначити, нехтуючи деформаціями та розширенням стінок труб, тиск в трубопроводі при нагріванні води в ньому до $15 \text{ }^\circ\text{C}$, якщо коефіцієнт об'ємного стиснення $\beta_p = 5 \times 10^{-10} \text{ Па}^{-1}$, а температурний коефіцієнт об'ємного розширення $\beta_t = 150 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$.

Рішення: Визначимо об'єм води в трубі при $t = 5 \text{ }^\circ\text{C}$:

$$V_1 = \pi \times r^2 \times L = 3,14 \times 0,25^2 \times 1000 = 196,35 \text{ м}^3$$

Знайдемо збільшення об'єму води внаслідок підвищення температури:

$$\Delta V = V_1 \times \Delta t \times \beta_t = 196,25 \times 10 \times 150 \times 10^{-6} = 0,295 \text{ м}^3.$$

Тоді з формули для визначення коефіцієнта об'ємного стиснення знаходимо значення Δp :

$$\Delta p = \frac{\Delta V}{V_1 \times \beta_p} = \frac{0,295}{196,35 \times 5 \times 10^{-10}} = 3000000 \text{ Па} = 3000 \text{ кПа.}$$

Тиск в трубопроводі після підвищення температури: $p = p_1 + \Delta p = 3,4 \text{ МПа}$.

Задача № 1.5. Визначити коефіцієнти динамічної і кінематичної в'язкості води, якщо кулька із ебоніту ($\rho_e = 1200 \text{ кг/м}^3$) діаметром $d = 2 \text{ мм}$ тоне у воді із постійною швидкістю $v = 0,33 \text{ м/с}$. Густина води $\rho_b = 1000 \text{ кг/м}^3$.

Рішення: При русі кульки в рідині із постійною швидкістю сила опору рівна вазі кульки. Силу опору можна визначити за формулою Стокса:

$$F = 3 \times \pi \times \mu \times v \times d.$$

Вагу кульки визначимо як: $G_k = \rho \times g \times \pi \times d^3 / 6$

Прирівнявши, визначимо значення μ : $\mu = \frac{\rho_a \times g \times d^2}{18 \times v} = 0,008 \text{ Па}\cdot\text{с}$.

Коефіцієнт динамічної в'язкості $\nu = \mu / \rho = 0,008 / 1000 = 8 \times 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$.

Задача № 1.6. Під час випробування системи загального протипожежного водопостачання допускається падіння тиску на протязі 10 хв на $\Delta p = 497104 \text{ Па}$. Визначити допустимі втрати ΔV при випробуванні системи місткістю $V_1 = 80 \text{ м}^3$. Коефіцієнт об'ємного стиснення рідини $\beta_p = 5 \times 10^{-10} \text{ Па}^{-1}$.

Рішення: Допустиму втрату визначимо як:

$$\Delta W = \beta_p \times V_1 \times \Delta p = 5 \times 10^{-10} \times 80 \times 497104 = 0,02 \text{ м}^3.$$

Задача № 1.7. Висота циліндричного вертикального резервуару рівна $h = 10 \text{ м}$, його діаметр $D = 3 \text{ м}$. Визначити масу мазуту ($\rho_0 = 920 \text{ кг/м}^3$), яку можна налити в резервуар при 15° C , якщо його температура може підвищитись до 40° C . Розширенням стінок резервуара знехтувати, температурний коефіцієнт об'ємного розширення рідини прийняти $\beta_t = 0,0008 \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$.

Рішення: При підвищенні температури рідина розширюється, її об'єм збільшується. Позначимо: V_0 і H_0 – об'єм і висота стовпа мазуту при 15° C , а V і H – при 40° C . Прийmemo, що величина H не може бути більшою висоти резервуара. Тоді можна записати:

$$\beta_t = \frac{V - V_0}{V_0} \frac{1}{\Delta t} = \frac{\frac{\pi D^2}{4} H - \frac{\pi D^2}{4} H_0}{\frac{\pi D^2}{4} H_0} \frac{1}{\Delta t} = \frac{H - H_0}{H_0} \frac{1}{\Delta t},$$

звідки, прийнявши $H = 10 \text{ м}$ і $\Delta t = 40 - 15^\circ = 25^\circ \text{ C}$, отримаємо

$$H_0 = \frac{H}{1 + \beta_t \Delta t} = \frac{10}{1 + 0,0008 \cdot 25} = 9,8 \text{ м}.$$

Знайдемо масу мазуту:

$$m = \rho_0 V_0 = \rho_0 \frac{\pi D^2}{4} H_0 = 920 \frac{3.14 \cdot 3^2}{4} 9.8 = 63700 \text{ кг.}$$

Задачі на самостійне рішення

Задача № 1.8. Як в процентному відношенні зміниться об'єм води при підвищенні тиску на поверхні рідини $\Delta p = 100$ МПа, якщо відомо: коефіцієнт об'ємного стиснення $\beta_p = 5 \times 10^{-10} \text{ Па}^{-1}$, початковий об'єм $V_1 = 10 \text{ м}^3$.

Відповідь: зменшиться на 5 %.

Задача № 1.9. Визначити зміну положення рівня рідини в вертикальному циліндричному резервуарі, заповненому оливою при 0° С на висоту 2,7 м при підвищенні температури рідини до 30° С , якщо температурний коефіцієнт об'ємного розширення рівний $0,0008 \text{ }^\circ \text{ С}^{-1}$ Деформацією стінок резервуару знехтувати.

Відповідь: рівень підніметься на 65 мм.

Задача № 1.10. Тиск води в заповненому товстостінному щільно закритому резервуарі рівний 0,2 МПа. Яким буде тиск при підвищенні температури води від 10 до 30° С ? Деформацією стінок посудини та зміною густини при зміні температури знехтувати.

Прийняти $\beta_p = 5 \times 10^{-10} \text{ Па}^{-1}$; $\beta_t = 150 \times 10^{-6} \text{ }^\circ \text{ С}^{-1}$.

Відповідь: тиск буде рівним 6,2 МПа.

Задача № 1.11. Визначити, наскільки зменшиться тиск оливи в закритому об'ємі ($V_0 = 150$ л) гідроприводу, якщо втрати оливи склали $\Delta V = 0,5$ л, а коефіцієнт об'ємного стиснення рідини $\beta_p = 7,5 \times 10^{-10} \text{ Па}^{-1}$. Деформацією елементів об'ємного гідроприводу, в яких знаходиться вказаний об'єм оливи, знехтувати.

Відповідь: тиск оливи зменшиться на 2,67 МПа.

Задача № 1.12. Визначити підвищення тиску в закритому об'ємі гідроприводу при підвищенні температури оливи від 20 до 40° С , якщо температурний коефіцієнт об'ємного розширення $\beta_t = 7 \cdot 10^{-4} \text{ }^\circ \text{ С}^{-1}$, а коефіцієнт об'ємного стиснення рідини $\beta_p = 6,5 \cdot 10^{-10} \text{ Па}^{-1}$. Втратами рідини і деформацією елементів конструкції об'ємного гідроприводу знехтувати.

Відповідь: тиск підвищиться на 21,7 МПа.

2. Гідростатичний тиск. Основне рівняння гідростатики

Задача № 2.1. Який абсолютний тиск діє в морській воді на глибині $h = 175$ м (Па), якщо відомо: густина $\rho = 1025$ кг/м³; прийняти 1 атм = 98100 Па.

Рішення: $p_{\text{абс}} = p_{\text{атм}} + p_{\text{ман}}$; де $p_{\text{абс}}$ – абсолютний тиск; $p_{\text{атм}}$ – атмосферний тиск; $p_{\text{ман}}$ – манометричний або надмірний тиск. Знайдемо значення манометричного тиску: $p_{\text{ман}} = \rho \times g \times h = 1025 \times 9,81 \times 175 = 1759668$ Па = 1760 кПа.

Тоді $p_{\text{абс}} = 98100 + 1759668 = 1857768$ Па = 1858 кПа.

Задача № 2.2. Визначити абсолютний та надмірний тиск в точці **A** (рис. 2.1), яка розташована на глибині $h_A = 2,5$ м, п'езометричну висоту для точки **A**, висоту підняття ртуті h_p , якщо абсолютний гідростатичний тиск на поверхні $p_0 = 150$ кПа. Прийняти питому вагу ртуті $\gamma_p = 133416$ н/м³, густину води $\rho_v = 1000$ кг/м³.

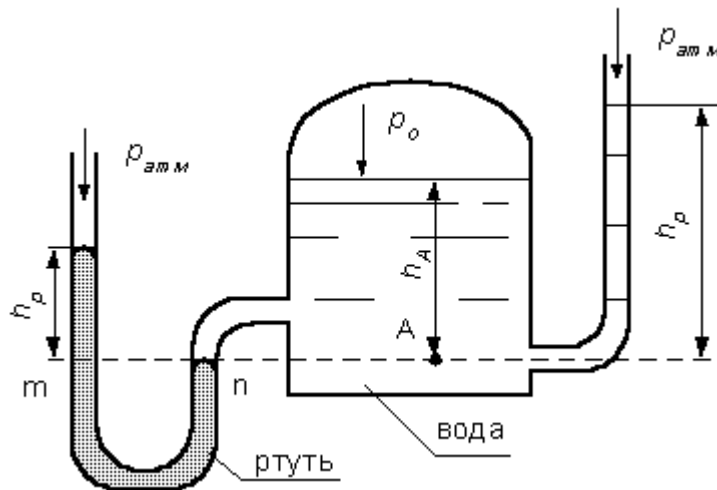


Рис. 2.1

Рішення: Згідно основного рівняння гідростатики абсолютний гідростатичний тиск в точці **A** визначається як:

$$p_{\text{абс}} = p_0 + \rho \times g \times h_A = 150000 + 1000 \times 9,81 \times 2,5 = 174525 \text{ Па.}$$

Надмірний тиск в точці **A** визначимо як:

$$p_{\text{ман}} = p_{\text{абс}} - p_{\text{атм}} = 174525 - 98100 = 76425 \text{ Па.}$$

П'езометричну висоту для точки **A**:

$$h_p = \frac{p_{\text{ман}}}{\rho \times g} = \frac{76425}{1000 \times 9,81} = 7,79 \text{ м.}$$

Лінія розділу **m – n** є лінією однакового тиску, тому можна записати:

$$p_{\text{атм}} + \gamma_{\text{рт}} \times h_p = p_0 + \rho_v \times g \times h_A, \text{ звідки}$$

$$h_p = \frac{p_0 + \rho_v \times g \times h_A - p_{\text{атм}}}{\gamma_{\text{рт}}} = \frac{150000 + 1000 \times 9,81 \times 2,5 - 98100}{133416} = 0,573 \text{ м.}$$

Задача № 2.3. Визначити манометричний тиск в трубопроводі **A** (рис. 2.2), якщо висота стовчика ртуті $h_2 = 25$ см. Центр трубопроводу розташований на відстані $h_1 = 40$ см нижче лінії розділу між водою і ртуттю. Прийняти питому вагу ртуті $\gamma_{рт} = 133416$ н/м³, питома вага води $\gamma_в = 9810$ н/м³.

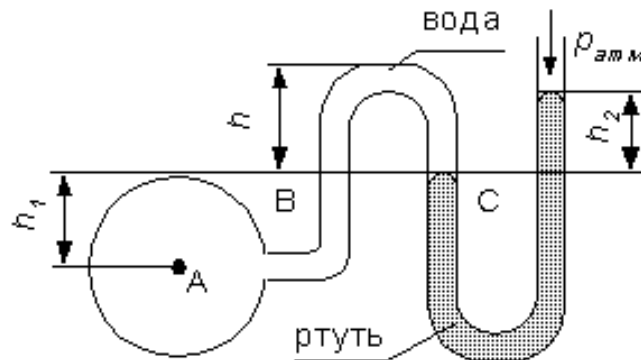


Рис. 2.2

Рішення: Складемо рівняння рівноваги дії тисків на нульову лінію:

$$p_A - \gamma_в \times h_1 = p_{атм} + \gamma_{рт} \times h_2$$

В цьому рівнянні p_A – абсолютний тиск в точці **A**; $p_A = p_m + p_{атм}$. Підставивши даний вираз в попереднє рівняння, отримаємо:

$$p_m = \gamma_{рт} \times h_2 + \gamma_в \times h_1 = 133416 \times 0,25 + 9810 \times 0,4 = 37278 \text{ Па.}$$

Задача № 2.4. Визначити абсолютний та манометричний тиск в резервуарі (рис. 2.3), наповненому нафтою глибиною $h = 3$ м, якщо тиск на вільній поверхні $p_0 = 200$ кПа. Густина нафти $\rho_н = 900$ кг/м³.

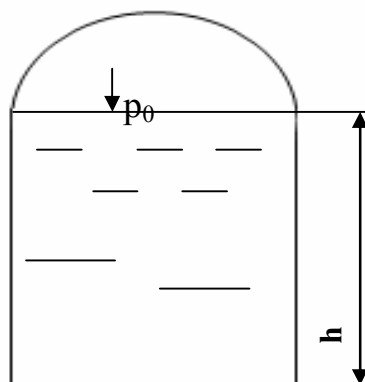


Рис. 2.3

Рішення: Абсолютний тиск на дні резервуару знаходимо за залежністю:

$$p_{Абс} = p_0 + \rho_н \times g \times h = 200000 + 900 \times 9,81 \times 3 = 226487 \text{ Па.}$$

Манометричний тиск: $p_m = p_{Абс} - p_{атм} = 226487 - 98100 = 128387$ Па.

Задача № 2.5. Визначити манометричний тиск води в трубі за показами батареїного ртутного манометра (рис. 2.4) в резервуарі, наповненому нафтою глибиною $h = 3$ м, якщо тиск на вільній поверхні $p_0 = 200$ кПа. Густина нафти $\rho_н =$

900 кг/м³. Відмітки рівнів ртуті від вісі труби: $z_1 = 1,75$ м; $z_2 = 3$ м; $z_3 = 1,5$ м; $z_4 = 2,5$ м; прийняти питому вагу ртуті $\gamma_p = 133416$ н/м³.

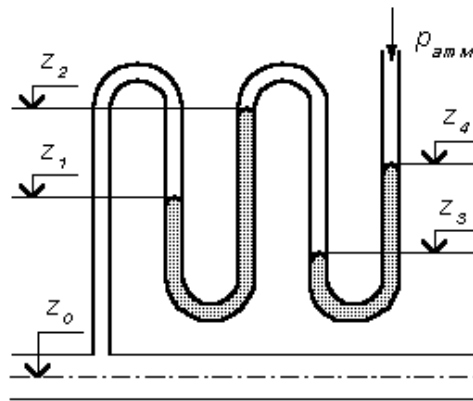


Рис. 2.4

Рішення: Батарейний ртутний манометр складається з двох послідовно з'єднаних ртутних манометрів. Тиск води в трубі врівноважується перепадами рівнів ртуті, а також перепадами рівнів води в трубках манометра. Додаючи покази манометра від відкритого кінця до з'єднання в трубі, отримаємо:

$$p_m = \gamma_p \times (z_4 - z_3) - \gamma_v \times (z_2 - z_3) + \gamma_p \times (z_2 - z_1) + \gamma_v \times (z_1 - z_0)$$

$$p_m = 133416 \times (2,5 - 1,5) - 9810 \times (3 - 1,5) + 133416 \times (3 - 1,75) + 9810 \times 1,75 = 302638 \text{ Па.}$$

Задачі на самостійне рішення

Задача № 2.6. На водопровідній трубі встановлений манометр, який показує тиск $p_{ман}$, кгс/см². Якій п'езометричній висоті відповідає цей тиск і чому рівний абсолютний тиск в трубі в одиницях СІ ?

Варіант	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5	№ 6	№ 7
$p_{ман}$, кгс/см ²	1,5	1,75	2	2,25	2,5	2,75	3
h_n (м)	15,3	17,84	20,39	22,94	25,48	28	30,58
$p_{абс}$ (Па)	248100	273100	298100	323100	348100	373100	398100
Варіант	№ 8	№ 9	№ 10	№ 11	№ 12	№ 13	№ 14
$p_{ман}$, кгс/см ²	3,25	3,5	3,75	4	4,25	4,5	4,7
h_n (м)	33,13	35,68	38,5	40,8	43,3	45,9	47,9
$p_{абс}$ (Па)	423100	448100	473100	498100	523100	548100	568100

Задача № 2.7. Знайти значення манометричного і абсолютного тиску (в одиницях СІ) на дні відкритого резервуару, наповненого водою, якщо глибина води рівна h , м.

Варіант	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5	№ 6	№ 7
$h, м$	5	6	7	8	9	10	11
$p_{ман}$ (Па)	49050	58860	68670	78480	88290	98100	107910
$p_{абс}$ (Па)	147150	156960	166770	176580	186390	196200	206010
Варіант	№ 8	№ 9	№ 10	№ 11	№ 12	№ 13	№ 14
$h, м$	12	13	14	15	16	17	18
$p_{ман}$ (Па)	117720	127530	137340	147150	156960	166770	176580
$p_{абс}$ (Па)	215820	225630	235440	245250	255060	264870	274680

Задача 2.8. Розрахувати значення надмірного та абсолютного тиску в точці А (рис. 2.5) для двох випадків:

1) в посудині та в лівій трубці – вода ($\gamma = 9810 \text{ н/м}^3 = 1000 \text{ кг/м}^3$), а в правій трубці – ртуть ($\gamma_{рт} = 133416 \text{ н/м}^3 = 13600 \text{ кг/м}^3$);

2) в посудині та в лівій трубці – повітря ($\gamma_i = 12,65 \text{ н/м}^3 = 1,29 \text{ кг/м}^3$, а в правій трубці – вода.

Визначити, який процент складає тиск стовпа повітря в трубці від розрахованого в другому випадку манометричного тиску?

При рішенні задачі прийняти $h_1 = 70 \text{ см}$, $h_2 = 50 \text{ см}$.

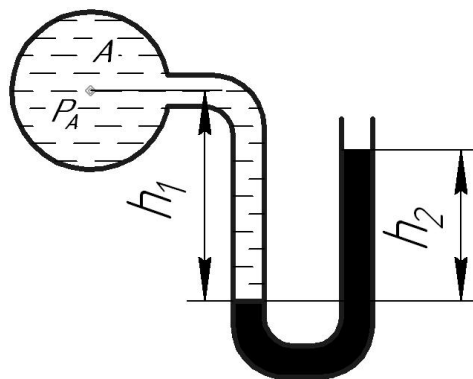


Рис. 2.5

Відповідь: 1) $p_a = 59833 \text{ н/м}^2 = 6100 \text{ кг/м}^2$; $p'_a = 157933 \text{ н/м}^2 = 16100 \text{ кг/м}^2$;
2) $p_A = 4896 \text{ н/м}^2 = 499 \text{ кг/м}^2$ $p'_a = 102996 \text{ н/м}^2 = 10499 \text{ кг/м}^2$.

Тиск повітря складає 0,18% від манометричного тиску, отже, тиск стовпа повітря в подальшому можна не враховувати. Тоді $p_A = 4905 \text{ н/м}^2 = 500 \text{ кг/м}^2$.
 $p'_a = 103005 \text{ н/м}^2 = 10500 \text{ кг/м}^2$.

Задача 2.9. Визначити, на якій висоті z встановиться рівень ртуті в п'єзометрі, якщо при манометричному тиску в трубці $p_a = 39240 \text{ н/м}^2$ ($0,4 \text{ кг/м}^2$) та показу $h = 24 \text{ см}$ система знаходиться в рівновазі (рис. 2.6).

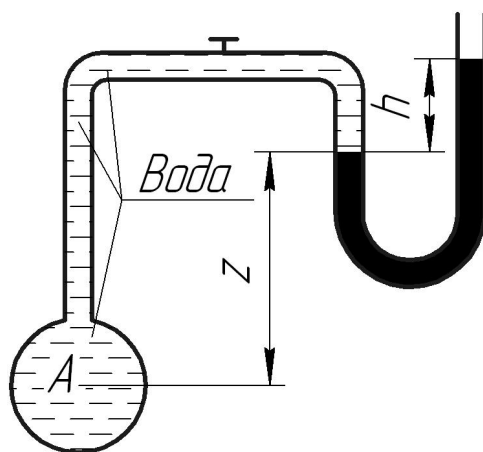


Рис. 2.6

Відповідь: $z = 60$ см.

Задача 2.10. Для схеми, приведеної на рис. 2.7, різниця тисків в балонах **A** і **B** становить $p'_a - p'_b = 844 \text{ н/м}^2$. Балони наповнені нафтою ($\gamma_i = 7848 \text{ н/м}^3$); Питома вага гасу ($\gamma_{\tilde{a}} = 7456 \text{ н/м}^3$). Визначити показ приладу **h**, якщо при попередній різниці тисків в балонах їх центри знаходились би на однаковій відмітці.

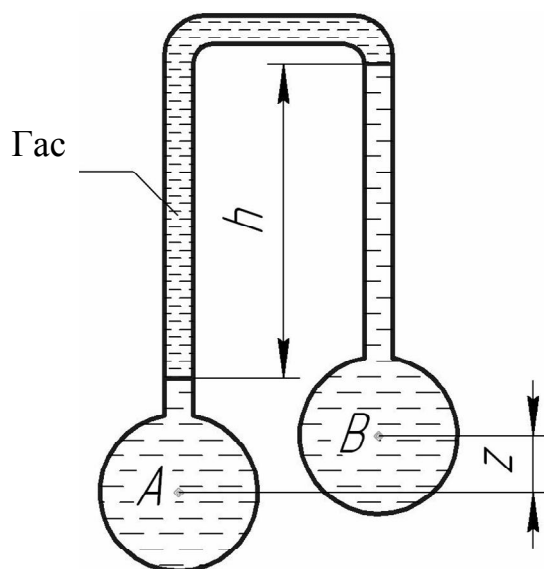


Рис. 2.7

Відповідь: $h = 2,15$ м, причому рівень гасу в правій трубі буде нижчим, ніж в лівій.

Вихідні дані для рішення задач 2.11 – 2.15

Вихідні дані	Номера з а д а ч				
	2.11	2.12	2.13	2.14	2.15
h , м	1,2	0,6	0,3	-	-
h_1 , м	0,4	0,4	0,7	0,3	0,4
h_2 , м	-	0,3	-	11,7	0,2

Задача 2.11. Закритий резервуар з водою (рис. 2.8) оснащений відкритим і закритим п'езометрами. Визначити приведену п'езометричну висоту h_x підняття води в закритому п'езометрі (яка відповідає абсолютному гідростатичному тиску в точці **A**), якщо показ відкритого п'езометра h при атмосферному тиску p_{at} , а точка **A** розташована вище точки **B** на величину h_1 .

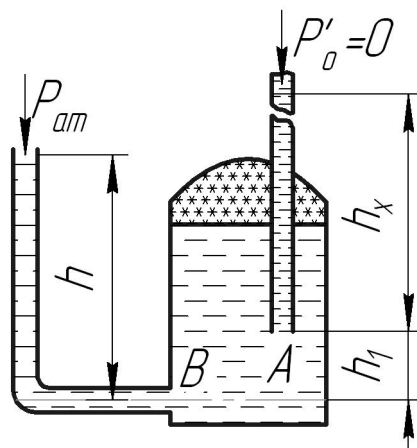


Рис. 2.8

Відповідь: $h_x = 10,8$ м.

Задача 2.12. Визначити абсолютний гідростатичний тиск в точці **A** закритого резервуару з водою (рис. 2.9), якщо при атмосферному тиску p_{at} висота стовпа ртуті в трубці диференціального манометра h , а лінія розділу між ртуттю і водою розташована нижче точки **B** на величину h_1 точка **B** – вище точки **A** на величину h_2 ; $\gamma_{\delta\delta} = 133416$ н/м³.

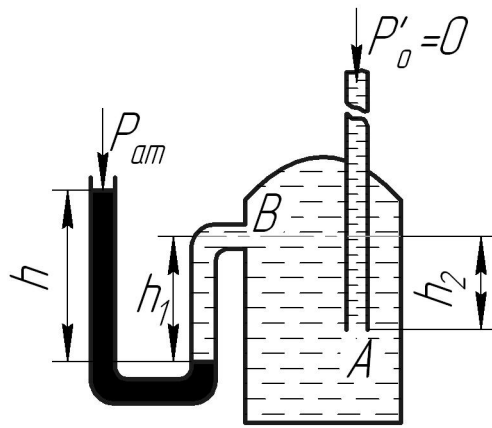


Рис. 2.9

Відповідь: $p_{абс} = 2,57 \cdot 10^5$ Па.

Задача 2.13. Закритий резервуар (рис. 2.10) оснащений диференціальним манометром, встановленим в точці **В** і закритим п'єзометром. Визначити приведену п'єзометричну висоту h_x підняття води в закритому п'єзометрі (яка відповідає абсолютному гідростатичному тиску в точці **А**), якщо при атмосферному тиску $p_{ат}$ висота стовпа ртуті в трубці диференціального манометра h , а точка **А** розташована на глибині h_1 від вільної поверхні.

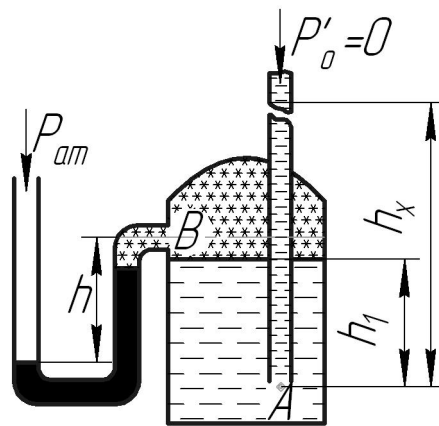


Рис. 2.10

Відповідь: $h_x = 6,62$ м.

Задача 2.14. Визначити при атмосферному тиску $p_{ат}$ висоту h_x підняття ртуті в диференціальному манометрі (рис. 2.11), що приєднаний до закритого резервуару в точці **В**, який частково заповнений водою, якщо глибина занурення точки **А** від вільної поверхні резервуару h_1 , а h_2 - приведена п'єзометрична висота підняття води в закритому п'єзометрі (яка відповідає абсолютному гідростатичному тиску в точці **А**)

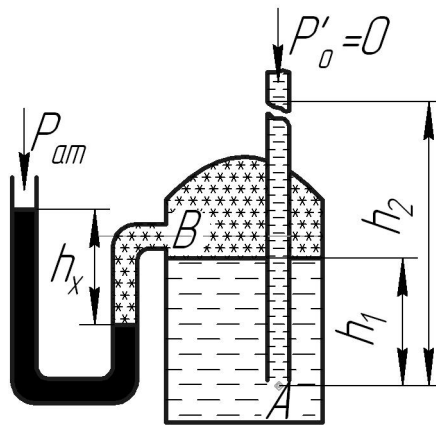


Рис. 2.11

Відповідь: $h_x = 0,1$ м.

Задача 2.15. До двох резервуарів А і В, заповнених морською водою (рис. 2.12), приєднаний диференціальний ртутний манометр. Скласти рівняння рівноваги відносно площини рівного тиску і визначити різницю тисків в резервуарах А і В, якщо відстань від осі резервуарів до ртуті h_1 і h_2 .

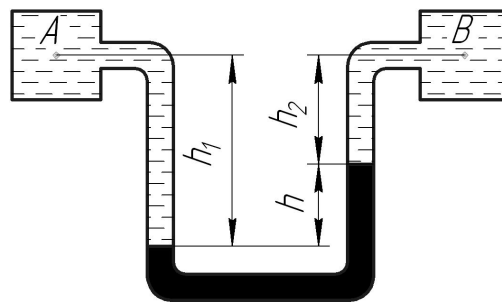


Рис. 2.12

Відповідь: $p_A - p_B = 3,8 \cdot 10^4$ Па.

3. Визначення сили тиску рідини на занурені тіла та точки її прикладання

Задача № 3.1. Визначити рівнодіючу силу P надмірного тиску води на плоску заслінку прямокутного перерізу (рис. 3.1), а також визначити відстань $h_{ц.в.}$ до центру тиску на заслінку зліва і справа і до центру тиску рівнодіючої сили. Відомо: глибина води зліва $h_1 = 3,2$ м, справа $h_2 = 2$ м, ширина затвора $b = 2,5$ м.

Рішення: Заслінка є плоским щитом, на який діють сили гідростатичного тиску з боку верхнього (зліва) і нижнього (справа) б'єфів (рис. 3.1). Тому при розрахунку сил гідростатичного тиску враховуємо змочену висоту заслінки, яка для верхнього і нижнього б'єфу різна і відповідає глибині води справа і зліва.

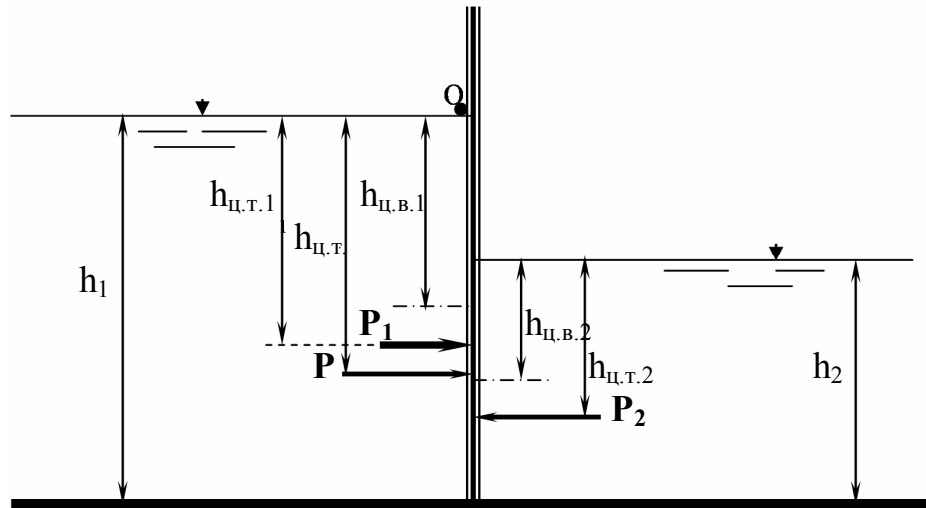


Рис. 3.1

Центр ваги змоченої поверхні заслінки в даному випадку знаходиться на середині її висоти: $h_{\ddot{o}.\hat{a}} = \frac{1}{2}h$, де h – глибина води, м.

Сила гідростатичного тиску визначається виразом: $D = \gamma_{\hat{a}} h_{\ddot{o}.\hat{a}} S$,

де $h_{\text{ц.в.}}$ – глибина занурення центру ваги змоченого перерізу заслінки, м;
 $\gamma_{\text{в}} = 9,81 \text{ кН/м}^3$ – питома вага води; S – площа змоченої частини заслінки, м^2 :
 $S = hb$, де b – ширина заслінки, м.

Глибина занурення центру тиску:

$$h_{\ddot{o}.\ddot{o}} = h_{\ddot{o}.\hat{a}} + \frac{I_0}{Sh_{\ddot{o}.\ddot{o}}},$$

де $I_0 = \frac{bh^3}{12}$ – момент інерції змоченої частини заслінки відносно горизонтальної осі, м^4 .

Змочені висоти затвора для верхнього і нижнього б'єфів відповідно:

$$h_{31} = h_1 = 3,2 \text{ м};$$

$$h_{32} = h_2 = 2,0 \text{ м}.$$

Глибини занурення центрів ваги змочених поверхонь заслінки:

$$h_{\ddot{o}.\hat{a}.1} = 0,5h_1 = 0,5 \cdot 3,2 = 1,6 \text{ м};$$

$$h_{\ddot{o}.\hat{a}.2} = 0,5h_2 = 0,5 \cdot 2,0 = 1,0 \text{ м}.$$

Площі змочених поверхонь:

$$S_1 = h_1 b = 2,5 \cdot 3,2 = 8,0 \text{ м}^2; S_2 = h_2 b = 2,5 \cdot 2,0 = 5,0 \text{ м}^2.$$

Сили гідростатичного тиску:

$$D_1 = \gamma_a h_{\bar{a}.1} S_1 = 9,81 \cdot 1,6 \cdot 4,0 = 62,784 \text{ кН}$$

$$D_2 = \gamma_a h_{\bar{a}.2} S_2 = 9,81 \cdot 1,0 \cdot 2,5 = 24,525 \text{ кН.}$$

Глибини занурення центрів тиску:

$$I_1 = \frac{bh_1^3}{12} = \frac{2,5 \cdot 3,2^3}{12} = 6,827 \text{ м}^4; I_2 = \frac{bh_2^3}{12} = \frac{2,5 \cdot 2,0^3}{12} = 1,667 \text{ м}^4.$$

$$l_{\bar{o}.1} = h_{\bar{o}.1} + \frac{I_1}{S_1 h_{\bar{o}.1}} = 1,6 + \frac{6,827}{8,0 \cdot 1,6} = 2,133 \text{ м};$$

$$l_{\bar{o}.2} = h_{\bar{o}.2} + \frac{I_2}{S_2 h_{\bar{o}.2}} = 1,0 + \frac{1,667}{5,0 \cdot 1,0} = 1,333 \text{ м.}$$

Рівнодіюча сила гідростатичного тиску P в даному випадку рівна різниці паралельних і направлених в протилежні сторони сил тиску:

$$D = D_1 - D_2 = 62,784 - 24,525 = 38,259 \text{ кН.}$$

Відстані до точки додатку до щита рівнодіючої сили гідростатичного тиску визначаємо щодо рівня верхнього б'єфу (точка O) з рівняння моментів:

$$D l_{\bar{o}.} = D_1 l_{\bar{o}.1} - D_2 (l_{\bar{o}.2} + h_1 - h_2); l_{\bar{o}.} = \frac{D_1 l_{\bar{o}.1} - D_2 (l_{\bar{o}.2} + h_1 - h_2)}{D};$$

$$l_{\bar{o}.} = \frac{62,784 \cdot 2,133 - 24,525 \cdot (1,333 + 3,2 - 2)}{38,259} = \frac{133,918 - 62,122}{38,259} = 1,877 \text{ м.}$$

Відповідь: $P = 38,259 \text{ кН}; I_{ц.т.1} = 2,133 \text{ м}; I_{ц.т.2} = 1,333 \text{ м}; I_{ц.т.} = 1,877 \text{ м.}$

Задача № 3.2. Визначити глибину h_p опори щита (рис. 3.2), щоб при $h_1 = 4,2 \text{ м}$, $h_2 = 1,8 \text{ м}$, $\beta = 30^\circ$ він відкривався автоматично. Вагою щита знехтувати. Розрахунок виконати для ширини щита $b = 1 \text{ м}$.

Рішення: Опора щита повинна знаходитись в точці прикладання рівнодіючої сил тиску води на щит. Визначимо силу тиску води на щит зі сторони рівня h_1 :

$$P_1 = \rho \times g \times z_{c1} \times S_1,$$

де ρ - густина води, $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$; z_{c1} - глибина занурення центра ваги щита;
 $z_{c1} = h_1/2 = 4,2/2 = 2,1 \text{ м}$; S_1 - площа змоченої поверхні щита,
 $S_1 = h_1 \times b / \cos 30^\circ = 4,2 \times 1 / \cos 30^\circ = 4,85 \text{ м}^2$; $P_1 = 1000 \times 9,81 \times 2,1 \times 4,85 = 100000 \text{ Н}$.

Координату точки прикладання сили P_1 визначаємо за формулою:

$$z_{p1} = l_{\text{д.а.}} + \frac{I_{01}}{l_{\text{д.а.}} \times S_1}, \text{ де } l_{\text{д.а.}} - \text{відстань від центра щита до лінії пере-}$$

тину площини щита з вільною поверхнею води,

$$l_{\text{д.а.}} = \frac{h_1}{2 \times \cos \beta} = \frac{4,2}{2 \times \cos 30^\circ} = 2,42 \text{ м}.$$

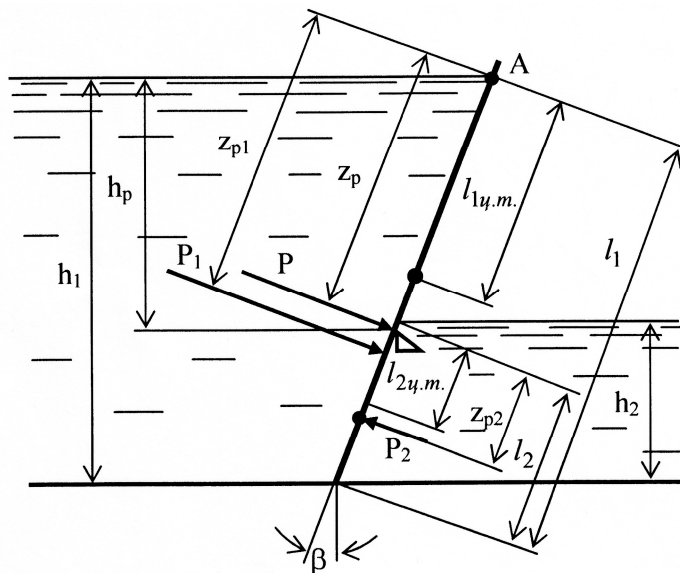


Рис. 3.2

Довжина $l_1 = h_1 / \cos 30^\circ = 4,2 / 0,866 = 4,85 \text{ м}$.

Момент інерції відносно центральної осі: $I_{01} = \frac{b \times l_1^3}{12} = \frac{1 \times 4,85^3}{12} = 9,5 \text{ м}^4$;

тоді $z_{p1} = 2,425 + \frac{9,5}{2,425 \times 4,85} = 3,234 \text{ м}$.

Аналогічно визначаємо параметри стосовно правої частини:

$z_{c2} = h_2/2 = 1,8/2 = 0,9 \text{ м}$; $S_2 = h_2 \times b / \cos 30^\circ = 1,8 \times 1 / 0,866 = 2,08 \text{ м}^2$;

$P_2 = \rho \times g \times z_{c2} \times S_2 = 1000 \times 9,81 \times 0,9 \times 2,08 = 18364 \text{ Н}$.

$l_2 = h_2 / \cos 30^\circ = 1,8 / 0,866 = 2,08 \text{ м}$.

$$I_{02} = \frac{b \times l_2^3}{12} = \frac{1 \times 2,08^3}{12} = 0,75 \text{ м}^4;$$

$$l_{2\delta.\dot{a}.} = \frac{h_2}{2 \times \cos \beta} = \frac{1,8}{2 \times 0,866} = 1,04 \text{ м.}$$

$$z_{p2} = l_{2\delta.\dot{a}.} + \frac{z_{02}^2}{l_{2\delta.\dot{a}.} \times S_2} = 1,04 + \frac{0,75}{1,04 \times 2,08} = 1,387 \text{ м.}$$

Рівнодіюча сил тиску рівна різниці сил, що діють на заслінку зліва та справа

$$P = P_1 - P_2 = 100000 - 18364 = 81636 \text{ Н.}$$

Складемо рівняння моментів відносно точки **A**:

$$D \times z_p = P_1 \times z_{p1} - P_2 \times \left(z_{p2} + \frac{h_1 - h_2}{\cos 30^0} \right), \text{ звідки}$$

$$z_p = \frac{P_1 \times z_{p1} - P_2 \times \left(z_{p2} + \frac{h_1 - h_2}{\cos 30^0} \right)}{P} = \frac{1000 \times 3,234 - 18364 \times \left(1,387 + \frac{4,2 - 1,8}{0,866} \right)}{81636} =$$

$$= 3 \text{ м.}$$

Глибину **h_p** знаходимо як $h_p = z_p \times \cos 30^0 = 3,026 \times 0,866 = 2,62 \text{ м.}$

Задача № 3.3. Вертикальний прямокутний щит (рис. 3.3) розміром $v \times h = 2 \times 2,5$ м утримує зліва воду. Визначити силу тиску рідини на щит **P** (Н) та координату центра тиску **h_{д.}** Прийняти густину води $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$.

Рішення: Силу тиску рідини на щит можна визначити за формулою:

$$P = \rho \times g \times h_{ц.в.} \times S,$$

де **h_{ц.в.}** – координата центра ваги щита; $h_c = h/2 = 1,25 \text{ м};$

S – площа поверхні щита, $S = a \times h = 2 \times 2,5 = 5 \text{ м}^2$.

Тоді $P = 1000 \times 9,81 \times 1,25 \times 5 = 61312 \text{ Н.}$

Координату точки прикладання сили **P** визначаємо за формулою:

$$h_{\delta.\dot{o}.} = h_{\delta.\dot{a}.} + \frac{z_0^2}{h_{\delta.\dot{a}.} \times S}; I_0 = \frac{b \times h^3}{12} = \frac{2 \times 2,5^3}{12} = 2,6 \text{ м}^4;$$

$$h_{\delta.\dot{o}.} = 1,25 + \frac{2,6}{1,25 \times 5} = 1,67 \text{ м.}$$

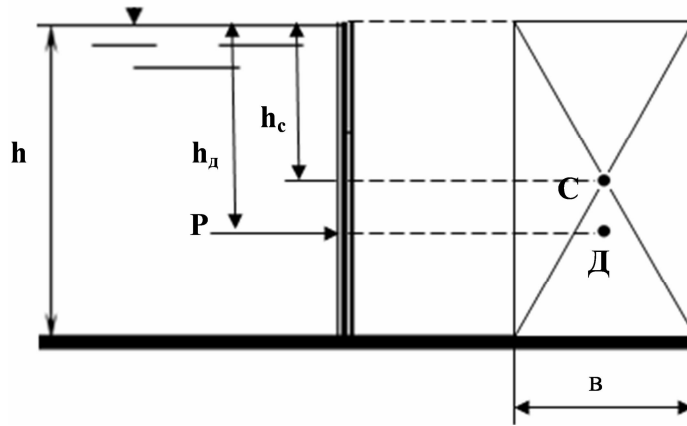


Рис. 3.3

Задача № 3.4. Знайти силу T , з якою треба тягнути трос, прикріплений до нижньої кромки плоскої круглої заслінки діаметром $d = 2$ м, що закриває отвір труби. Заслінка може обертатись навкруги шарніру A . Глибина води над верхньою кромкою заслінки $h = 3$ м (рис 3.4). Трос напрямлений під кутом 45° до горизонту.

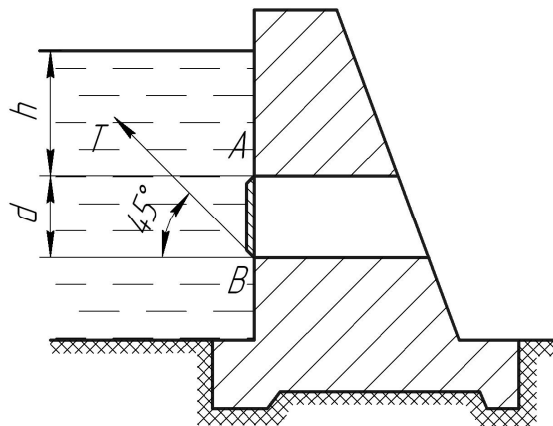


Рис. 3.4

Рішення: Визначимо площу перерізу $S = \pi \cdot r^2 = 3,14 \text{ м}^2$. Координату центра ваги щита $h_{ц.в.}$ визначаємо як $d/2 + h = 1 + 3 = 4$ м. Тоді значення сили тиску на заслінку можна знайти як $P = 1000 \cdot 9,81 \cdot 4 \cdot 3,14 = 123200 \text{ Н}$.

Положення центру тиску знаходимо як $h_{\ddot{o}.\ddot{o}.} = h_{\ddot{o}.\ddot{a}.} + \frac{I_0}{h_{\ddot{o}.a.} \times S}$, де $I_0 = \pi d^4 / 64$.

Підставивши відповідні дані, отримаємо $h_{\ddot{o}.a.} = 4,06 \text{ м}$.

Складемо рівняння моментів відносно шарніру A :

$$\dot{O} \times d \sin 45^\circ - P(h_{\ddot{o}.a.} - h) = 0, \text{ звідки}$$

$$T = \frac{P(h_{\text{д.д.}} - h)}{d \sin 45^0} = \frac{123,2 \cdot 1,06 \cdot 2}{2 \cdot \sqrt{2}} = 92400 \text{ Н.}$$

Отже, сила, з якою треба тягнути трос, $T = 92,4$ кН.

Задачі на самостійне рішення

Задача № 3.5. Прямокутний клапан розмірами $a \times b = 0,5 \times 0,6$ м закриває отвір в дні резервуару. Вага клапану $G = 12$ кГ. Глибина води в резервуарі $h = 2$ м. Клапан обертається навкруги шарніру A (рис 3.5).

Визначити: 1) на якій відстані x від шарніру треба прикріпити трос, щоб при його підніманні отримати найменше зусилля T ? Знайти величину цього зусилля. 2) Визначити, яким би було рівним зусилля T , якби трос був прикріплений в середині клапану? ($x = 0,25$ м)? Тертя не враховувати.

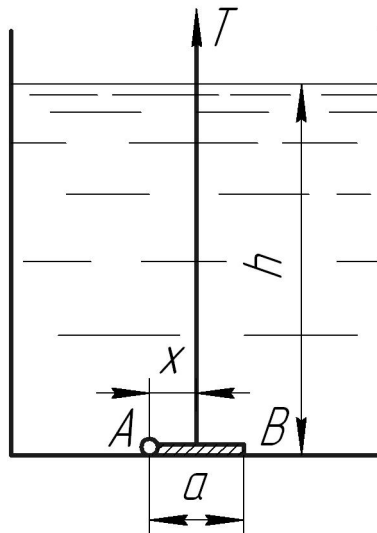


Рис. 3.5

Відповідь: 1) Трос треба прикріпити в точці B на $0,5$ м від шарніру; $T = 3002 \text{ Н} = 306 \text{ кГ}$; 2) $T = 6004 \text{ Н} = 612 \text{ кГ}$.

Задача № 3.6. Заслінка квадратного перерізу зі стороною $a = 2$ м може обертатись навкруги горизонтальної осі, яка проходить через центр заслінки. Знайти силу F , яку необхідно прикласти до нижньої кромки заслінки, щоб її закрити, якщо глибина перед нею $h = 3,2$ м (рис 3.6). Справа від заслінки повітря. Тертям знехтувати.

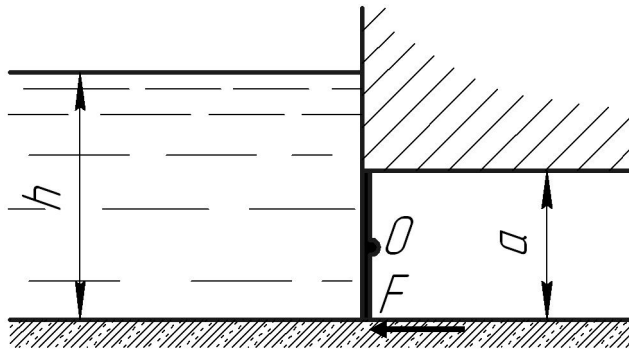


Рис. 3.6

Відповідь: $F = 13 \text{ кН} = 1,33 \cdot 10^3 \text{ кГ}$.

Задача № 3.7. Жолоб для зкидання води має форму напівкруга діаметром $d = 1,4 \text{ м}$ та перекривається плоскою заслінкою. Визначити силу тиску води та центр тиску, вважаючи, що вільна поверхня води знаходиться на одному рівні з вершиною заслінки.

Відповідь: $P = 2,24 \text{ кН} = 228 \text{ кГ}$; $h_{\text{ц.т.}} \approx 0,41 \text{ м}$.

Задача № 3.8. В резервуарі зберігається олива ($\gamma_i = 8829 \text{ н/м}^3 = 900 \text{ кГ/м}^3$), є отвір, що закритий прямокутною плоскою заслінкою висотою $a = 0,3 \text{ м}$. Рівень оливи знаходиться на $h = 0,5 \text{ м}$ вище верхньої кромки заслінки. Заслінка може обертатись навкруги шарниру А (рис. 3.7). Визначити ширину заслінки b , щоб при її закритті сила P_1 , прикладена до верхньої кромки, не перевищувала 157 Н .

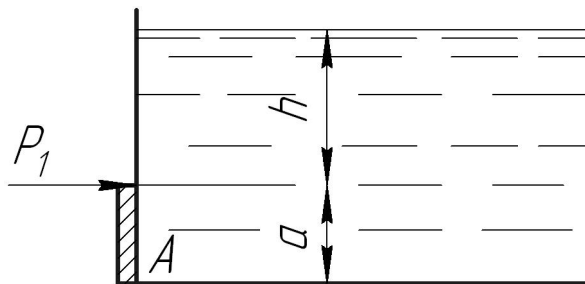


Рис. 3.7

Відповідь: $b \approx 0,20 \text{ м}$.

Задача № 3.9. На яку глибину треба опустити нижню кромку круглої плоскої заслінки діаметром $d = 0,8 \text{ м}$ (рис 2.20), щоб відстань між центром ваги C і центром тиску D , що виміряна в вертикальній площині, складала $\frac{1}{32}d, \frac{1}{16}d, \frac{1}{8}d,$

та $\frac{1}{4}d$.

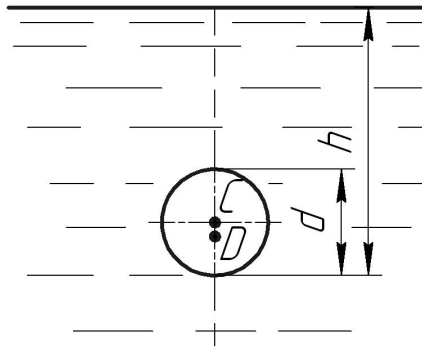


Рис. 3.8

Відповідь: $h = 2 \text{ м}; 1,2 \text{ м}; 0,8 \text{ м}; 0,6 \text{ м}.$

Задача № 3.10. Визначити необхідну глибину води h перед плоскою заслінкою, щоб відстань між точкою прикладання сили тиску та центом тяжіння заслінки не перевищувала $0,10 \text{ м}$. Заслінка квадратна зі сторонами $a = 1,4 \text{ м}$. Визначити, чому рівна сила тиску P на заслінку? Знайти, як понизиться центр тиску, якщо глибина води над верхньою кромкою буде рівною $0,4 \text{ м}$?

Відповідь: $h = 2.33 \text{ м}; P = 31,4 \text{ кН} = 3,2 \cdot 10^3 \text{ кГ};$ центр тиску понизиться приблизно на $0,05 \text{ м}$.

Задача № 3.11. Плоский прямокутний щит розмірами $a = 2 \text{ м}$, шириною $b = 1,5 \text{ м}$ (рис. 2.21) перекриває вихідний отвір резервуару. Глибина води перед щитом від вільної поверхні води до нижньої його кромки $h_1 = 3 \text{ м}$, за щитом - $h_2 = 1,6 \text{ м}$. Визначити початкову силу натягу T тросу, необхідну для відкриття щита. Тертям в шарнірах та вагою щита знехтувати.

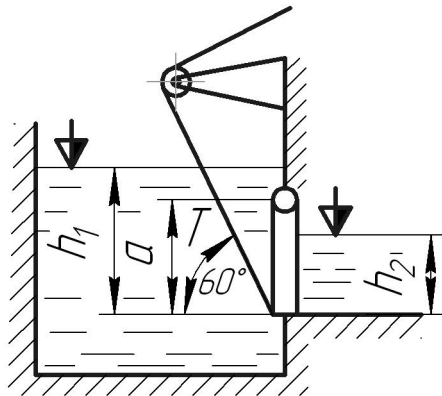


Рис. 3.9

Відповідь: $T = 158600 \text{ Н}.$

Задача № 3.12. Канал перекривається щитом шириною $b = 4 \text{ м}$, вагою $G = 19,6 \text{ кН}$, з кутом нахилу $\alpha = 60^\circ$ (рис. 3.10). Глибина води перед щитом $h_1 = 3 \text{ м}$, а за ним - $h_2 = 1,2 \text{ м}$. Визначити, нехтуючи тертям в шарнірі, початкову силу T , яку необхідно прикласти для піднімання щита.

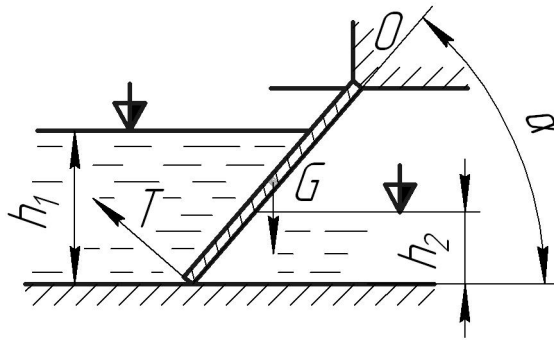


Рис. 3.10

Відповідь: $T = 125400 \text{ Н}$.

Задача № 3.13. Визначити вагу поплавка діаметром $D = 20 \text{ см}$, який при шарі бензину $H \geq 80 \text{ см}$ міг би забезпечити автоматичне відкриття клапана діаметром $d = 4 \text{ см}$ (рис. 3.11). Довжина тяги $h = 74 \text{ см}$. Вагу клапана та тяги прийняти $1,7 \text{ Н}$. Відносна питома вага бензину $0,75$.

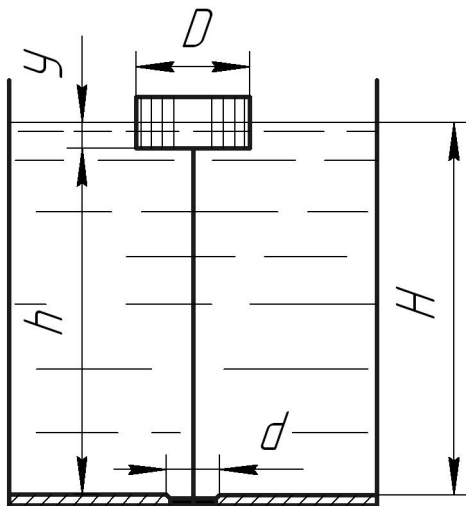


Рис. 3.11

Відповідь: $G_n = 4,77 \text{ Н}$.

4. Основи теорії плавання

Задача № 4.1. Прямокутна металева баржа довжиною $L = 60 \text{ м}$, шириною $b = 8 \text{ м}$, висотою $h = 3,5 \text{ м}$, завантажена піском, важить $G = 14125 \text{ кН}$. Визначити осадку баржі y . Який об'єм піску V_n треба вивантажити, щоб глибина занурення баржі була $h_2 = 1,2 \text{ м}$, якщо відносна питома вага вологого піску $\delta = 2$.

Рішення: умова плавання баржі можна записати як $P_z = G$, де $P_z = \gamma_v \times W_0$;

де W_0 – водозміщення. Тоді $\gamma_b \times v \times L \times y = G$, звідки

$$y = \frac{G}{\gamma_a \times a \times L} = \frac{14126000}{9810 \times 8 \times 60} = 3 \text{ м.}$$

Знайдемо значення P_{z2} після вивантаження піску:

$$P_{z2} = \gamma_b \times v \times L \times h_2 = 9810 \times 8 \times 60 \times 1,2 = 5650560 \text{ Н.}$$

Вагу вивантаженого піску знайдемо як:

$$G_{\pi} = G - P_{z2} = 14126000 - 5650560 = 8475440 \text{ Н.}$$

Оскільки питома вага піску $\gamma_{\pi} = 2 \times \gamma_b$, то $V_i = \frac{G_i}{2 \times \gamma_a} = \frac{8475440}{2 \times 9810} = 432 \text{ м}^3$.

Задача № 4.2. Прямокутна баржа розміром 18 х 9 м, коли її загрузили піском, занурилась у воду на 0,5 м в порівнянні з початковим положенням до завантаження. Визначити:

- 1) Об'єм піска в баржі (відносна питома вага піску дорівнює $\delta = 2$).
- 2) Висоту шару піску, вважаючи, що пісок в баржі покладено по всій площі дна рівномірно. Товщину стінок баржі не враховувати.

Відповідь: 1) 40,5 м³; 2) 0,25 м.

Задача № 4.3. Кусок граніту важить в повітрі 14,72 Н = 1,5 кГ та 10,01 Н = 1,02 кГ в рідині, відносна питома вага якої $\delta = 0,8$. Визначити його об'єм та питому вагу.

Відповідь: 1) $V = 600 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$; $\gamma_{\delta} = 24525 \text{ н/м}^3 = 24,5 \text{ кн/м}^3$.

Задача № 4.4. Прямокутна металева баржа довжиною 60 м, шириною 8 м, висотою 3,5 м, загрузена піском, важить 14126 кН = 1440 · 10³ кГ. Визначити осадку баржі. Який об'єм піску V_{π} треба вивантажити, щоб глибина занурення баржі була 1,2 м, якщо відносна питома вага піску дорівнює $\delta = 2$.

Відповідь: $y = 3 \text{ м}$; $V_{\pi} = 432 \text{ м}^3$.

Задача № 4.5. Об'ємне водозміщення підводного човна $W = 600 \text{ м}^3$. З метою занурення підводного човна відсіки були заповнені морською водою в кількості 80 м³. Відносна питома вага морської води $\delta = 1,025$.

Визначити:

- 1) Яка частина об'єму човна (в процентах) буде занурена в воду, якщо із човна видалити всю воду і він виплеве на поверхню.

- 2) Чому дорівнює вага підводного човна без води?

Відповідь: 1) 86,7%; 2) $522;9 \cdot 10^4 = 5229 \text{ кН} = 533 \cdot 10^3 \text{ кГ}$.

Задача № 4.6. Визначити, при якому значенні манометричного тиску води p_m всередині водопровідної труби відкриється клапан k , що закриває при горизонтальному положенні важеля ab отвір труби. (рис. 4.1). Плече b в 5 разів більше, ніж плече a . Діаметр труби $d = 50 \text{ мм}$, а пустотілого шару $D = 200 \text{ мм}$. При розрахунках вагу пустотілого шару, а також вагу важеля не враховувати. В резервуарі налита вода.

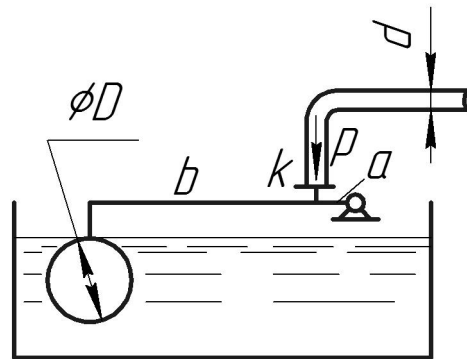


Рис.4.1

Відповідь: $p_m \geq 12,56 \cdot 10^4 \text{ Па}$.

Задача № 4.7. Кусок льоду розміром $50 \times 50 \times 10 \text{ см}$ вільно плаває в посудині, заповненою водою, температура якої $0 \text{ }^\circ\text{C}$. Відносна вага льоду $\delta = 0,9$. Якщо лід буде танути, то чи зміниться рівень води в посудині? Пояснити чому.

5. Рівняння Д. Бернуллі

Задача № 5.1. Поршень діаметром $D = 270 \text{ мм}$ рухається рівномірно вниз в циліндрі, подаючи рідину Ж (гас) у відкритий резервуар з постійним рівнем (рис. 5.1). Діаметр трубопроводу $d = 90 \text{ мм}$, його довжина $l = 27 \text{ м}$. Коли поршень знаходиться нижче рівня рідини в резервуарі на $H = 5 \text{ м}$, то потрібна сила для його переміщення $F = 27700 \text{ Н}$. Визначити швидкість поршня і витрату рідини в трубопроводі. Побудувати напірну та п'єзометричну лінії для трубопроводу. Коефіцієнт гідравлічного тертя прийняти $\lambda = 0,03$. Коефіцієнт опору при вході в трубу $\zeta_{\text{вх}} = 0,5$. Коефіцієнт опору при виході в резервуар $\zeta_{\text{вих}} = 1,0$.

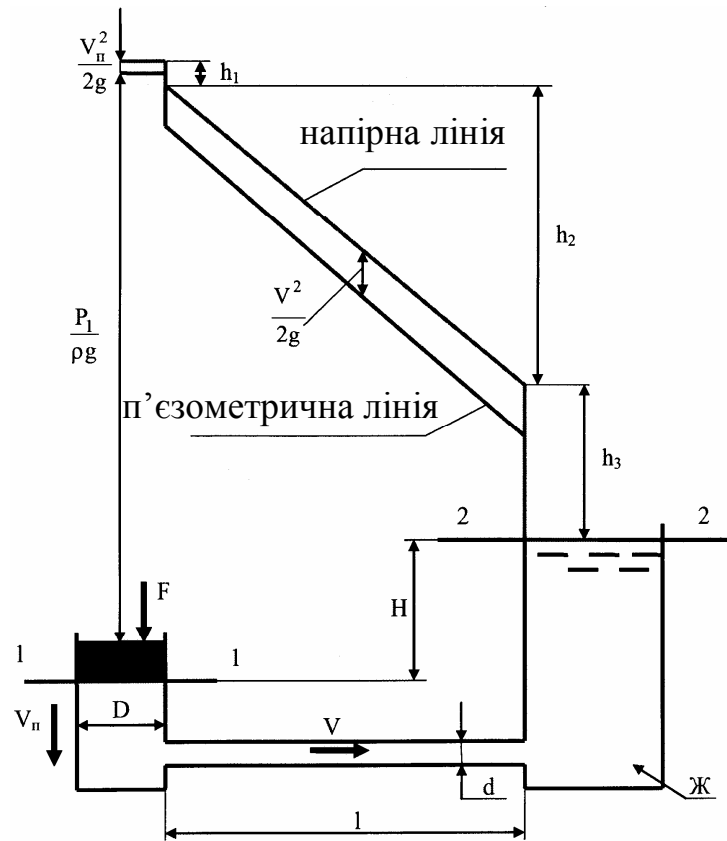


Рис. 5.1

Рішення: Складемо рівняння Бернуллі для перерізів 1-1 і 2-2 та визначимо їх складові:

$$z_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} = z_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} + h_i + h_l.$$

Складові: $z_1 = 0$; $\alpha_1 = 1$; $z_2 = H$; $P_2 = P_n = 0$ (надмірний тиск); $V_2 = 0$;

$h_i = (\zeta_{a\delta} + \zeta_{ai\delta}) \frac{V^2}{2g}$ - місцеві втрати напору, м;

$h_l = \lambda \frac{1}{d} \frac{V^2}{2g}$ - втрати напору по довжині.

Із рівняння нерозривності потоку:

$$V = V_i \left(\frac{D}{d} \right)^2$$

Перепишемо рівняння Бернуллі з врахуванням отриманих вище даних:

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} = H + \left(\zeta_{\hat{a}\hat{o}} + \zeta_{\hat{a}i\hat{o}} + \lambda \frac{1}{d} \right) \frac{V_1^2}{2g} \left(\frac{D}{d} \right)^4$$

де V – швидкість руху рідини в трубопроводі, м/с;

$V_{\text{п}}$ – швидкість руху поршня, м/с.

ρ - густина гасу, кг/м³.

Умова рівноваги сил для поршня D :

$$F - P_1 \frac{\pi D^2}{4} = 0,$$

з якого знайдемо значення надмірного тиску P_1 :

$$P_1 = \frac{4F}{\pi D^2} = \frac{4 \cdot 27700}{3,14 \cdot 0,270^2} = 484041 \text{ Па}$$

З рівняння (1) знайдемо швидкість руху поршня $V_{\text{п}}$:

$$V_{\text{п}} = \sqrt{\frac{2g \cdot \left(\frac{P_1}{\rho g} - H \right)}{\left(\zeta_{\hat{a}\hat{o}} + \zeta_{\hat{a}i\hat{o}} + \lambda \frac{1}{d} \right) \cdot \left(\frac{D}{d} \right)^4 - 1}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 9,81 \cdot \left(\frac{484041}{820 \cdot 9,81} - 5 \right)}{\left(0,5 + 1,0 + 0,03 \frac{27}{0,090} \right) \cdot \left(\frac{0,270}{0,090} \right)^4 - 1}} = 1,129 \text{ м/с}$$

Знайдемо швидкість рідини в трубопроводі:

$$V = 1,129 \left(\frac{0,270}{0,090} \right)^2 = 10,2 \text{ м/с}$$

Тоді витрата рідини в трубопроводі:

$$Q = V \frac{\pi d^2}{4} = 10,2 \frac{3,14 \cdot 0,09^2}{4} = 0,065 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Побудуємо п'єзометричну і напірну лінії (див. рис.):

- над поршнем п'єзометрична лінія:

$$\frac{P_1}{\rho g} = \frac{484041}{820 \cdot 9,81} = 60,2 \text{ м}$$

- напірна лінія над поршнем:

$$\frac{V_i^2}{2g} = \frac{1,129^2}{2 \cdot 9,81} = 0,06 \text{ м}$$

- напірна лінія над трубою:

$$\frac{V^2}{2g} = \frac{10,2^2}{2 \cdot 9,81} = 5,3 \text{ м}$$

- втрати напору на вході в трубу:

$$h_1 = \zeta_{\text{вх}} \frac{V^2}{2g} = 0,5 \frac{10,2^2}{2 \cdot 9,81} = 2,6 \text{ м}$$

- втрати напору по довжині трубопроводу:

$$h_2 = \lambda \frac{1}{d} \frac{V^2}{2g} = 0,03 \cdot \frac{27}{0,09} \cdot \frac{10,2^2}{2 \cdot 9,81} = 47,4 \text{ м}$$

- втрати напору на виході з резервуару:

$$h_3 = \zeta_{\text{вих}} \frac{V^2}{2g} = 10 \frac{10,2^2}{2 \cdot 9,81} = 5,3 \text{ м}$$

Відповідь: $V_{\text{п}} = 1,129 \text{ м/с}$, $Q = 0,0646 \text{ м}^3/\text{с}$.

Задача № 5.2. Визначити діаметр d_2 звуженої частини трубопроводу, в якому надмірний тиск $p_1 = 50 \cdot 10^{-3} \text{ Па}$. Витрата води $Q = 0,021 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$, діаметр $d_1 = 125 \text{ мм}$, висота $h_{\text{вак}} = 2,5 \text{ м}$. Втратами напору знехтувати.

Рішення: Нехтуючи втратами напору, запишемо рівняння Бернуллі

$$\frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{p_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g},$$

$$\text{Оскільки } Q = v_1 \cdot S_1 = v_2 \cdot S_2 \Rightarrow v_1 = \frac{Q}{S_1};$$

$$S_1 = \frac{\pi \cdot d_1^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 0,125^2}{4} = 0,012 \text{ м}^2.$$

$$\text{Тоді } v_1 = \frac{0,021}{0,012} = 1,75 \text{ м/с}$$

Вакуумметричний тиск визначимо як:

$$h_{\text{вак}} = \frac{P_{\text{атм}} - P_2}{\gamma} \Rightarrow P_2 = P_{\text{атм}} - h_{\text{вак}} \gamma,$$

$$h_2 = 10 - 2,5 = 7,5 \text{ м}$$

$$50 + \frac{1,75^2}{2 \cdot 9,81} = 7,5 + \frac{v_2^2}{2 \cdot 9,81},$$

$$v_2 = 28,9 \text{ м/с}$$

$$S_2 = \frac{v_1 \cdot \omega_1}{v_2} = \frac{1,75 \cdot 0,012}{28,9} = 0,00073 \text{ м}^2$$

$$d_2 = \sqrt{\frac{\omega_2 \cdot 4}{\pi}} = \sqrt{\frac{0,00073 \cdot 4}{3,14}} = 0,03 \text{ м} = 30 \text{ мм}.$$

Задача № 5.3. Нехтуючи втратами напору, визначити діаметр горловини d_2 (рис. 5.2), щоб при пропусканні витрати води по трубопроводу $Q = 8,8 \text{ л/сек}$ вода по труці піднімалась на висоту $h_{\text{вак}} = 55 \text{ см}$. Діаметр трубопроводу $d_1 = 100 \text{ мм}$, а абсолютний тиск в перерізі $1-1$ $p_1 = 102 \text{ кПа}$.

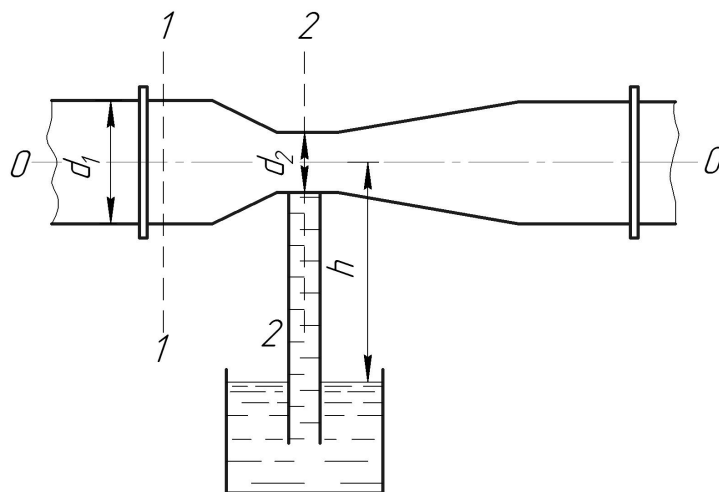


Рис. 5.2

Рішення: Складемо рівняння Бернуллі для перерізів 1-1 і 2-2, прийнявши за площину порівняння вісь труби:

$$\frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{p_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g}.$$

Знайдемо складові даного рівняння. По визначенню вакуумметричний тиск $p_{\text{вак}} = p_{\text{атм}} - p_2$; звідки $p_2 = p_{\text{атм}} - p_{\text{вак}}$. Тиск $p_{\text{вак}} = h_{\text{вак}} \cdot \gamma = 0,55 \cdot 9810 = 5395$ Па.
Тоді $p_2 = 98100 - 5395 \approx 92700$ Па.

Знайдемо швидкість руху рідини в першому перерізі при $Q = 8,8$ л/сек = 8800 см³/сек

$$v_1 = \frac{Q}{S_1} = \frac{8800}{78,5} = 112 \text{ см/сек} = 1,12 \text{ м/сек}.$$

$$\begin{aligned} \text{З рівняння Бернуллі швидкість } v_2 &= \sqrt{\frac{2g(p_1 - p_2)}{\gamma} + v_1^2} = \\ &= \sqrt{\frac{2 \cdot 9,81 \cdot (102000 - 92700)}{9810} + 1,12^2} = 4,46 \text{ м/сек}. \end{aligned}$$

Визначимо діаметр горловини:

$$d_2 = \sqrt{\frac{4Q}{\pi v_2}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,088}{3,14 \cdot 4,46}} = 0,05 \text{ м} = 5 \text{ см}.$$

Задача № 5.4. Визначити швидкість руху води на вісі труби $u_{\text{макс}}$, якщо різниця показів між динамічною a і статичною b трубками, яка визначена по показах ртутного диференціального п'єзометра, складає $h = h_1 = 1,5$ см (рис. 5.3).

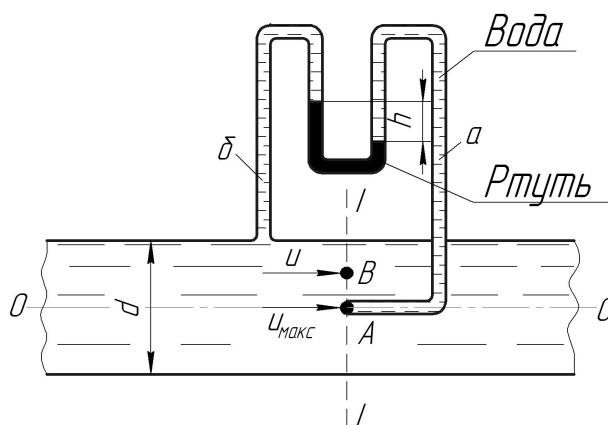


Рис. 5.3

Яким буде співвідношення швидкостей в точках **A** і **B**, якщо в точці **B** різниця показів $h = h_2 = 1,3$ см. Втратами напору в трубці знехтувати.

Рішення: Запишемо рівняння Бернуллі для даного випадку

$$\frac{p_A}{\gamma} + \frac{u_{\text{макс}}^2}{2g} = \frac{p_B}{\gamma} + \frac{\gamma p_0 h}{\gamma} - \frac{\gamma h}{\gamma}$$

Після скорочення отримаємо:

$$\frac{u_{\text{макс}}^2}{2g} = h \left(\frac{\gamma p_0}{\gamma} - 1 \right)$$

Отже, при відсутності втрат напору в трубці

$$u_{\text{макс}} = \sqrt{2gh \left(\frac{\gamma p_0}{\gamma} - 1 \right)} = 4,43 \sqrt{0,015 \cdot 12,6} \approx 1,93 \text{ м/сек.}$$

Співвідношення швидкостей в точках **A** і **B**

$$\frac{u_{\text{макс}}}{u} = \frac{\sqrt{2gh \left(\frac{\gamma p_0}{\gamma} - 1 \right)}}{\sqrt{2gh \left(\frac{\gamma p_0}{\gamma} - 1 \right)}} \cdot \frac{\sqrt{h_1}}{\sqrt{h_2}} = \frac{\sqrt{h_1}}{\sqrt{h_2}} = \frac{\sqrt{0,015}}{\sqrt{0,013}} = 1,08,$$

тобто швидкості в різних точках відносяться одна до другої як квадратні корені із висот стовпів рідини в диференціальному п'езометрі.

Задачі на самостійне рішення

Задача № 5.5. Визначити, нехтуючи втратами напору, витрату води, яку треба пропускати по трубопроводу (рис. 5.2), щоб значення вакууму в звуженій частині не перевищувало (29430 Н/м^2). Діаметр трубопроводу $d_1 = 200 \text{ мм}$, діаметр звуженої частини $d_2 = 100 \text{ мм}$. Абсолютний тиск в перерізі 1-1 $p_1 = 137300 \text{ Н/м}^2$.

Відповідь: $Q = 3,03 \text{ м}^3/\text{сек}$.

Задача № 5.6. Для виміру витрати води переріз трубопроводу діаметром $d_1 = 100 \text{ мм}$, різко звужується до діаметра $d_2 = 56 \text{ мм}$. До перерізів *A* і *B* (рис. 5.4) приєднаний п'єзометр. Нехтуючи втратами напору між перерізами, визначити витрату води в трубопроводі між перерізами та швидкості в перерізах, якщо показ п'єзометра $h = 40 \text{ см}$. При розрахунках висотою стовпа повітря в п'єзометрі знехтувати. Коефіцієнт Коріоліса прийняти рівним одиниці.

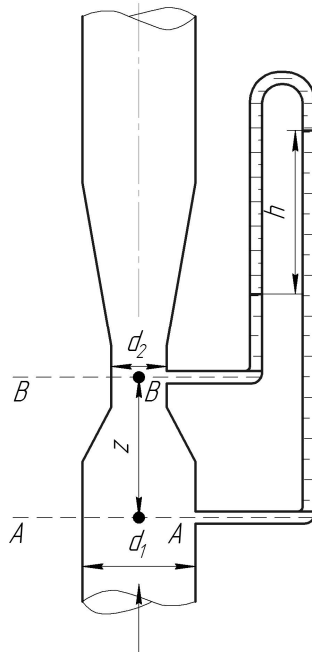


Рис. 5.4

Відповідь: $Q = 7,26 \text{ л/сек}$; $v_1 = 0,93 \text{ м/сек}$; $v_2 = 2,95 \text{ м/сек}$.

Задача № 5.7. По трубопроводам *A* і *B* однакового діаметру ($d_1 = d_2 = 100 \text{ мм}$) під тиском подається вода. До трубопроводів приєднаний п'єзометр для вимірювання різниці тиску в трубах (рис. 5.5). Визначити швидкості руху води в трубопроводах та витрату Q_A в трубопроводі *A*, якщо питомі енергії в трубопроводах *A* і *B* рівні. Показ ртутного п'єзометра $z = 1 \text{ см}$. Витрата води в трубопроводі *B* рівна $Q_B = 11,8 \text{ л/сек}$.

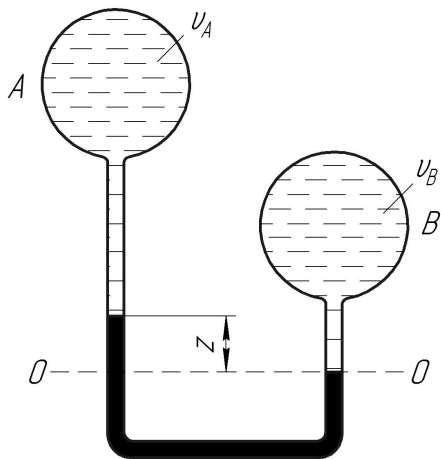


Рис. 5.5

Відповідь: $v_A = 2,18 \text{ м/сек}$; $v_B = 1,5 \text{ м/сек}$; $Q_A = 17,1 \text{ л/сек}$.

Задача № 5.8. Використовуючи прилад, показаний на рис. 5.6, визначити швидкість руху води в точці *A*, якщо різниця показів між динамічною і статичною трубками рівна $h = 2,5 \text{ см}$. В якості робочої рідини застосований гас (густина $\rho = 800 \text{ кг/м}^3$). Якби замість гасу був застосований газ (повітря), питомою вагою якого можна знехтувати, то з якою швидкістю повинна була б рухатися вода в тій же точці, щоб покази приладу залишилися незмінними ($h = 2,5 \text{ см}$)? Втрати напору в трубі знехтувати.

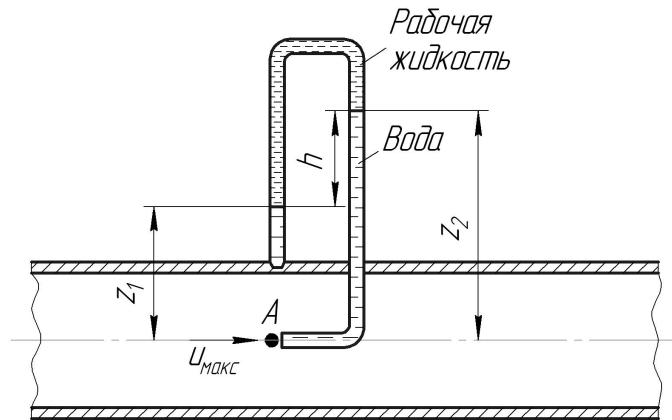


Рис. 5.6

Відповідь: 1) $u_{\text{макс}} = 0,63 \text{ м/сек}$; 2) $u_{\text{макс}} = 0,70 \text{ м/сек}$, отже, в першому випадку при тих же показах приладу можна вимірювати менші значення швидкостей.

Задача № 5.9. По трубопроводу діаметром 200 мм , який раптово звужується до діаметра 100 мм , подається олива (густина $\rho = 750 \text{ кг/м}^3$). Тиск в перерізі першої труби з діаметром $d_1 = 200 \text{ мм}$, рівний $176,58 \text{ кН/м}^2$ (18 м вод. ст.), а в другому перерізі з $d_2 = 100 \text{ мм}$ – $147,15 \text{ кН/м}^2$ (15 м вод. ст.). Геометрична висота

першого перерізу над площиною порівняння, що проходить через центр ваги другого перерізу, рівна 1 м. Витрата оливи, яка подається по трубопроводу $Q = 31,4 \text{ дм}^3/\text{сек}$.

Визначити:

- 1) Втрати напору на ділянці.
- 2) Гідродинамічний напір в першому перерізі.

Відповідь: 1) $h_{\text{тр}} \approx 4,24 \text{ м. ст. оливи} = 3,18 \text{ м вод. ст.}$; 2) $H \approx 25,05 \text{ м. ст. оливи} = 18,79 \text{ м вод. ст.}$

Задача № 5.10. Водомір, встановлений на горизонтальному трубопроводі, поступово звужується від діаметру $d_1 = 100 \text{ мм}$ до діаметру $d_2 = 50 \text{ мм}$. Визначити, при якому манометричному тиску в першому перерізі почнеться пароутворення в горловині водоміра, якщо витрата води, яка пропускається по трубопроводу, $Q = 28,6 \text{ л/сек}$. При розрахунку прийняти найменший абсолютний тиск для води рівним тиску пароутворення $p_a = 2940 \text{ н/м}^2$ при температурі $20 \text{ }^\circ\text{C}$. Втратами напору знехтувати.

Відповідь: 1) $p = 4169 \text{ н/м}^2 = 425 \text{ кг/м}^2$.

Задача № 5.11. Трубопровід, що в перерізі 1-1 має діаметр, рівний 150 мм, поступово розширюється до діаметру 400 мм в перерізі 2-2. Центр ваги перерізу 1-1 розташований на 2,0 м нижче центру перерізу 2-2. Витрата води, що пропускається по трубопроводу $Q = 0,106 \text{ м}^3/\text{сек}$. Визначити різницю тисків між перерізами 1-1 і 2-2. Величину втрат прийняти рівною 20% від втрат напору при раптовому розширенні трубопроводу.

Відповідь: $p_1 - p_2 = 4,63 \text{ кн/м}^2 = 0,463 \cdot 10^4 \text{ н/м}^2 = 472 \text{ кг/м}^2$.

6. Визначення режимів руху рідини. Критичне значення числа Рейнольдса

Задача № 6.1. Вода при температурі $t = 12 \text{ }^\circ\text{C}$ подається по трубі діаметром $d = 4 \text{ см}$. Витрата води $Q = 70 \text{ см}^3/\text{сек}$. Визначити режим руху рідини. Яку витрату треба пропускати по трубі, щоб змінити режим руху?

Рішення: З додатку 1 визначимо кінематичний коефіцієнт в'язкості для води при температурі $t = 12 \text{ }^\circ\text{C}$, тобто $\nu = 0,0124 \text{ см}^2/\text{сек}$.

Швидкість руху рідини в трубі

$$v = \frac{Q}{S} = \frac{70}{12,56} = 5,6 \text{ см/сек},$$

де

$$S = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 4^2}{4} = 12,56 \text{ см}^2.$$

Знайдемо число Рейнольдса

$$Re = \frac{vd}{\nu} = \frac{5,6 \cdot 4}{0,0124} = 1810.$$

Так як $Re < Re_{кр} = 2320$, то режим руху буде ламінарним.

Знайдемо швидкість, при якій режим руху перейде в турбулентний:

$$v_{\text{êđ}} = \frac{\nu Re_{\text{êđ}}}{d} = \frac{0,0124 \cdot 2320}{4} = 7,2 \text{ см/сек.}$$

Витрату $Q_{кр}$ визначимо за формулою

$$Q_{\text{êđ}} = Sv_{\text{êđ}} = 12,56 \cdot 7,2 = 90,4 \text{ см}^3/\text{сек.}$$

Отже, для створення в трубі турбулентного руху необхідно пропускати витрату води більшу ніж $90,4 \text{ см}^3/\text{сек.}$

Задача № 6.2. Визначити критичне значення витрати рідини $Q_{кр}$, при якій збережеться ламінарний режим для випадку перетікання рідини через прямокутний переріз $\mathbf{a} \times \mathbf{b}$. Відомо: $\mathbf{a} = 2$ м, $\mathbf{b} = 3$ м. Кінематичний коефіцієнт в'язкості води $\nu = 1 \times 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$.

Рішення: Значення числа Рейнольдса для будь-якого перерізу можна визначити за залежністю:

$$Re = \frac{v \times R}{\nu},$$

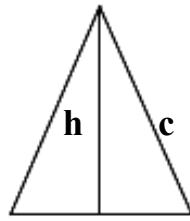
де ν - швидкість, м/с; R - гідравлічний радіус, $R = \frac{S}{\chi}$, χ - змочений периметр, $\chi = 2 \cdot (2 + 3) = 10$ м. Швидкість руху рідини можна визначити як:

$v = \frac{Q}{S}$. Підставивши дані співвідношення в перше рівняння, отримаємо:

$Re = \frac{Q \times S}{S \times \chi \times \nu} = \frac{Q}{\chi \times \nu}$. Прирівняємо даний вираз до критичного числа

580, тоді: $\frac{Q_{\text{êđ}}}{\chi \times \nu} = 580$, звідки $Q_{\text{êđ}} = 580 \times \nu \times \chi = 580 \times 1 \times 10^{-6} \times 10 =$
 $= 580 \times 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с} = 5,8 \text{ л/с.}$

Задача № 6.3. Визначити критичне значення витрати рідини $Q_{кр}$, при якій збережеться ламінарний режим для випадку перетікання рідини через трикутний переріз $\mathbf{v} \times \mathbf{h}$ (рис. 6.1; трикутник – рівнобедрений). Відомо: $v = 2$ м, $h = 3$ м. Кінематичний коефіцієнт в'язкості води $\nu = 1 \times 10^{-6}$ м²/с.



в
рис. 6.1

Рішення: Позначимо бічну сторону літерою c . З теореми Піфагора

$$c = \sqrt{h^2 + \frac{b^2}{4}} = 3,162 \text{ м. Тоді змочений периметр, } \chi = 2 \times c + v = 8,325 \text{ м.}$$

$$Q_{êð} = 580 \times \nu \times \chi = 580 \times 1 \times 10^{-6} \times 8,325 = 4,83 \times 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с} = 4,83 \text{ л/с.}$$

Задача № 6.4. По трубопроводу діаметром $d = 100$ мм пропускається вода з витратою $Q = 2,5 \times 10^{-2}$ м³/с. Кінематичний коефіцієнт в'язкості води ($\nu = 1 \times 10^{-6}$ м²/с). Визначити режим руху рідини. При якій швидкості режим руху зміниться на протилежний?

Рішення: Значення числа Рейнольдса для круглого перерізу можна визначити за залежністю:

$$Re = \frac{v \times d}{\nu},$$

де v - швидкість м/с; d - діаметр труби, м; ν - кінематичний коефіцієнт в'язкості. Значення швидкості руху рідини можна визначити за формулою:

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

Тоді, підставляючи значення, надані в умові задачі, отримаємо:

$$v = \frac{4 \times 2,5 \times 10^{-2}}{3,14 \times 0,1^2} = 3,18 \text{ м/с;}$$

$$Re = \frac{3,18 \times 0,1}{1 \times 10^{-6}} = 3,183 \times 10^5 > 2320.$$

Отже, режим руху – турбулентний. Критичне значення числа Рейнольдса для

нашого випадку – 2320. Тоді $\frac{v_{\text{крит}} \times d}{\nu} = 2320$, звідки $v_{\text{крит}} = \frac{2320 \times \nu}{d} =$
 $= \frac{2320 \times 1 \times 10^{-6}}{0,1} = 0,023 \text{ м/с.}$

Задачі на самостійне рішення

Задача № 6.5. По трубі діаметром $d = 40 \text{ мм}$ подається вода із швидкістю $v_1 = 4,96 \text{ см/сек}$ при температурі $t = 12^\circ \text{ С}$. Труба поступово звужується до діаметра $d_2 = 20 \text{ мм}$. Визначити витрату води та режими руху в широкій та вузькій частинах труби.

Відповідь: $Q = 62,3 \text{ см}^3/\text{сек}$; $Re_1 = 1600$ (ламінальний режим);
 $Re_2 = 3200$ (турбулентний режим).

Задача № 6.6. Визначити для попередньої задачі, яку витрату води треба подавати по трубам, щоб в широкій частині діаметром $d_1 = 40 \text{ мм}$ встановився турбулентний режим. Чому буде рівним число Рейнольдса в звуженій частині труби при такій витраті? Температура води $t = 12^\circ \text{ С}$.

Відповідь: $Q = 90,3 \text{ см}^3/\text{сек}$; $Re_2 = 4640$.

Задача № 6.7. По трубі діаметром d пропускають воду з витратою Q . Кінематичний коефіцієнт в'язкості $\nu = 1 \times 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$. Визначити число Рейнольдса та режим руху рідини.

Варіанти	1	2	3	4	5
d, мм	0,1	0,2	0,25	0,3	0,55
Q, м ³ /с	1×10^{-3}	$1,5 \times 10^{-3}$	2×10^{-3}	$2,5 \times 10^{-3}$	3×10^{-3}
Відповідь Re	$1,273 \times 10^4$	$9,55 \times 10^3$	$1,02 \times 10^4$	$1,06 \times 10^4$	$6,945 \times 10^3$

Задача № 6.8. Переріз потоку рухомої рідини – рівносторонній трикутник стороною a . Витрата рідини Q . Кінематичний коефіцієнт в'язкості $\nu = 1 \times 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$. Визначити число Рейнольдса та режим руху рідини.

Варіанти	1	2	3	4	5
a, мм	0,1	0,2	0,25	0,3	0,5
Q, м ³ /с	1×10^{-3}	$1,5 \times 10^{-3}$	2×10^{-3}	$2,5 \times 10^{-3}$	1×10^{-2}
Відповідь Re	$3,33 \times 10^3$	$2,5 \times 10^3$	$2,667 \times 10^3$	$2,78 \times 10^3$	$6,667 \times 10^3$

Задача № 6.9. Переріз потоку рухомої рідини – прямокутник $a \times b$. Витрата рідини Q . Кінематичний коефіцієнт в'язкості $\nu = 1 \times 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$. Визначити число Рейнольдса та режим руху рідини.

Варіанти	1	2	3	4	5
a, мм	0,5	0,7	1,3	1,5	2
b, мм	1,5	2	2,5	3	3,5
Q, м ³ /с	2×10^{-2}	$1,5 \times 10^{-2}$	2×10^{-3}	$2,5 \times 10^{-3}$	1×10^{-2}
Відповідь Re	5×10^3	$2,778 \times 10^3$	263	278	900

Варіанти	6	7	8	9	10
a, мм	1,5	0,8	0,6	0,8	1,2
b, мм	2	4	1,2	1,8	2
Q, м ³ /с	2×10^{-3}	3×10^{-3}	$2,5 \times 10^{-3}$	2×10^{-3}	$2,5 \times 10^{-3}$
Відповідь Re	285	312	694	385	390

Варіанти	11	12	13	14	15
a, мм	1,4	1,6	1,8	2	2,2
b, мм	2,2	2,4	2,6	2,8	3
Q, м ³ /с	3×10^{-3}	$2,8 \times 10^{-3}$	3×10^{-3}	$3,5 \times 10^{-3}$	$3,8 \times 10^{-3}$
Відповідь Re	416	350	340	364	365

Задача № 6.10. Визначити критичне значення витрати рідини Q , при якій збережеться ламінарний режим ($\nu = 1 \times 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$) при протіканні води через трубу діаметром d .

Варіанти	1	2	3	4	5
d, мм	0,1	0,2	0,25	0,3	0,5
Відповідь Q_{кр.} , м ³ /с	$1,822 \times 10^{-4}$	$3,644 \times 10^{-4}$	$4,55 \times 10^{-4}$	$5,466 \times 10^{-4}$	$9,11 \times 10^{-4}$

Задача № 6.11. Переріз потоку рухомої рідини – рівносторонній трикутник стороною a . Витрата рідини Q . Кінематичний коефіцієнт в'язкості ν . Визначити критичне значення витрати рідини Q , при якій збережеться ламінарний режим ($\nu = 1 \times 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$)

Варіанти	1	2	3	4	5
a, мм	0,1	0,2	0,25	0,3	0,5
Q, м ³ /с	1×10 ⁻³	1,5×10 ⁻³	2×10 ⁻³	2,5×10 ⁻³	1×10 ⁻²
Відповідь Q _{кр} , м ³ /с	1,74×10 ⁻⁴	3,48×10 ⁻⁴	4,35×10 ⁻⁴	5,22×10 ⁻⁴	8,7×10 ⁻⁴

Задача № 6.12. Переріз потоку рухомої рідини – прямокутник a×b. Витрата рідини Q. Кінематичний коефіцієнт в'язкості ν . Визначити критичне значення витрати рідини Q, при якій збережеться ламінарний режим ($\nu = 1 \times 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$).

Варіанти	1	2	3	4	5
a, мм	0,5	0,7	1,3	1,5	2
b, мм	1,5	2	2,5	3	3,5
Q, м ³ /с	2×10 ⁻²	1,5×10 ⁻²	2×10 ⁻³	2,5×10 ⁻³	1×10 ⁻²
Відповідь Q _{кр} , м ³ /с	2,32×10 ⁻³	3,13×10 ⁻³	4,4×10 ⁻³	5,22×10 ⁻³	6,38×10 ⁻³

7. Визначення загальних втрат напору при русі рідини в простому трубопроводі

Задача № 7.1. Визначити втрати напору при подачі води із швидкістю $v = 13,1 \text{ см/сек}$, при температурі $t = 10 \text{ }^\circ\text{C}$ по трубопроводу діаметром $d = 200 \text{ мм}$, довжиною $l = 1500 \text{ м}$. Труби – нові, сталеві.

Рішення: Визначимо режим руху рідини, прийнявши для $t = 10 \text{ }^\circ\text{C}$ кінематичний коефіцієнт в'язкості $\nu = 0,0131 \text{ см}^2/\text{сек}$ (додаток I)

$$Re = \frac{13,1 \cdot 20}{0,0131} = 20000.$$

Так як $Re = 20000 > 2320$, то режим руху турбулентний. Знайдемо число Рейнольда, що відповідає межі гладкої зони:

$$Re_{\text{гладка}} = 27 \left(\frac{d}{\Delta} \right)^{8/7}.$$

Для нових сталевих труб висота шорсткості $\Delta \approx 0,45 \text{ мм}$. Прийmemo $\Delta = 0,45 \text{ мм}$, знайдемо:

$$\text{Re}_{\tilde{a}\tilde{e}} = 27 \left(\frac{200}{0,45} \right)^{8/7} = 28667.$$

Так як число $\text{Re} = 20000 < 28667$, то даний випадок відповідає області гладких труб.

Знайдемо λ за формулою Конова:

$$\lambda = \frac{1}{(1,8 \lg \text{Re} - 1,52)^2} = 0,0257.$$

Визначаємо втрати напору

$$h_{\text{од}} = \lambda \frac{l}{d} \cdot \frac{v^2}{2g} = 0,0257 \cdot \frac{1500}{0,2} \cdot \frac{0,131^2}{19,62} = 0,169 \text{ м} \approx 0,17 \text{ м}.$$

Задача № 7.2. По трубопроводу діаметром $d = 100$ мм, шорсткість внутрішніх стінок якого $\Delta = 0,2$ мм, пропускається вода з витратою $Q = 3 \times 10^{-2}$ м³/с на відстань $L = 100$ м. Сумарний коефіцієнт місцевих опорів $\Sigma \xi_i = 12$. Кінематичний коефіцієнт в'язкості $\nu = 1 \times 10^{-6}$ м²/с. Визначити сумарні втрати напору ΣH_b (м).

Рішення: Сумарні втрати напору ΣH_b визначаються за формулою:

$$\Sigma H_b = h_l + h_m,$$

де h_l – втрати напору по довжині трубопроводу, h_m – втрати напору на подолання місцевих опорів.

Оскільки трубопровід простий (не має розгалужень, $d = \text{const}$), то сумарні втрати можна знайти як

$$\Sigma H_a = \frac{v^2}{2g} \left(\lambda \frac{l}{d} + \Sigma \xi_s \right).$$

Знаходимо значення швидкості руху рідини:

$$v = \frac{4Q}{\pi d^2} = \frac{4 \times 3 \times 10^{-2}}{3,14 \times 0,1^2} = 3,82 \text{ м/с}.$$

Знаходимо режим руху рідини:

$$\text{Re} = \frac{v \times d}{\nu} = \frac{3,82 \times 0,1}{1 \times 10^{-6}} = 381971$$

Отже, режим руху – турбулентний. Визначимо вид турбулентного руху:

$$K = \text{Re} \times \frac{\Delta}{d} = 381971 \times \frac{0,2}{100} = 764 - 3 \text{ вид турбулентного руху.}$$

Для визначення значення коефіцієнта тертя використаємо формулу Шифрінсона:

$$\lambda = 0,11 \cdot \left(\frac{\Delta}{d} \right)^{0,25} = 0,023$$

Підставивши знайдені значення швидкості, коефіцієнта тертя та параметрів, наданих в умові задачі, отримаємо:

$$\Sigma H_{\hat{a}} = \frac{3,82^2}{2 \times 9,81} \left(0,023 \frac{100}{0,1} + 12 \right) = 26,32 \text{ м.}$$

Знайдемо значення втрати напору в одиницях тиску

$$P_{\hat{a}} = \Sigma H_{\hat{a}} \cdot \gamma = 26,3 \cdot 9810 = 258000 \text{ Па.}$$

Задачі на самостійне рішення

Задача № 7.3. По трубопроводу довжиною $L = 8$ м пропускається олива. Визначити діаметр трубопроводу d , мм, якщо втрати напору по довжині $h_l = 2,5$ мм, витрата $Q = 1,5$ л/с, кінематичний коефіцієнт в'язкості $\nu = 1,6$ см²/с. Втрати напору на подолання місцевих опорів не враховувати. Припустити ламінарний режим руху рідини. При якій витраті режим руху зміниться на протилежний?

Відповідь: $d = 4,2$ см, $Q = 12,3$ л/с.

Задача № 7.4. По трубопроводу діаметром $d = 150$ мм пропускається вода з витратою $Q = 5 \times 10^{-2}$ м³/с на відстань $L = 150$ м. Сумарний коефіцієнт місцевих опорів $\Sigma \xi_i = 20$. Коефіцієнт тертя $\lambda = 0,02$. Визначити сумарні втрати напору ΣH_v (м). Кінематичний коефіцієнт в'язкості води ($\nu = 1 \times 10^{-6}$ м²/с).

Відповідь: $\Sigma H_v = 16,3$ м.

Задача № 7.5. По трубопроводу діаметром $d = 250$ мм пропускається вода з витратою $Q = 8 \times 10^{-2}$ м³/с на відстань $L = 200$ м. Сумарний коефіцієнт місцевих опорів $\Sigma \xi_i = 20$. Коефіцієнт тертя $\lambda = 0,02$. Визначити сумарні втрати напору ΣH_v (м). Кінематичний коефіцієнт в'язкості води ($\nu = 1 \times 10^{-6}$ м²/с).

Відповідь: $\Sigma H_v = 23,5$ м.

Задача № 7.6. По трубопроводу діаметром $d = 300$ мм пропускається вода з витратою $Q = 0,25$ м³/с на відстань $L = 250$ м. Сумарний коефіцієнт місцевих опорів $\Sigma \xi_i = 20$. Коефіцієнт тертя $\lambda = 0,02$. Визначити сумарні втрати напору ΣH_B (м). Кінематичний коефіцієнт в'язкості води ($\nu = 1 \times 10^{-6}$ м²/с).

Відповідь: $\Sigma H_B = 23,4$ м.

Задача № 7.7. По трубопроводу діаметром $d = 350$ мм пропускається вода з витратою $Q = 0,3$ м³/с на відстань $L = 300$ м. Сумарний коефіцієнт місцевих опорів $\Sigma \xi_i = 20$. Коефіцієнт тертя $\lambda = 0,02$. Визначити сумарні втрати напору ΣH_B (м). Кінематичний коефіцієнт в'язкості ($\nu = 1 \times 10^{-6}$ м²/с), шорсткість внутрішніх стінок трубопроводу $\Delta = 0,2$ мм.

Відповідь: $\Sigma H_B = 18,4$ м.

Варіанти	1	2	3	4	5
d, мм	100	150	200	150	200
Q, м ³ /с	2×10^{-2}	$2,5 \times 10^{-2}$	3×10^{-2}	$3,5 \times 10^{-2}$	2×10^{-2}
L, мм	150	200	250	300	350
$\Sigma \xi_i$	15	20	15	20	15
Відповідь ΣH_B , (м)	14,8	4,7	1,8	12	1

Варіанти	6	7	8	9	10
d, мм	150	200	150	120	140
Q, м ³ /с	$2,5 \times 10^{-2}$	3×10^{-2}	4×10^{-2}	$3,5 \times 10^{-2}$	4×10^{-2}
L, мм	400	450	500	300	350
$\Sigma \xi_i$	20	15	20	15	20
Відповідь ΣH_B , (м)	7,5	2,8	22,6	31,7	24,1

Варіанти	11	12	13	14	15
d, мм	160	200	180	220	250
Q, м ³ /с	$4,2 \times 10^{-2}$	$4,4 \times 10^{-2}$	4×10^{-2}	5×10^{-2}	$5,5 \times 10^{-2}$
L, мм	400	450	400	500	550
$\Sigma \xi_i$	15	20	15	15	20
Відповідь ΣH_B , (м)	14,5	6,5	7,5	5,3	4,1

8. Витікання рідини через насадки і короткі трубопроводи при постійному напорі

Задача № 8.1. До відкритого резервуару (рис. 2.32) з правої сторони приєднаний короткий сталевий трубопровід, який складається з двох ділянок довжиною $l_1 = 5$ м і $l_2 = 12$ м діаметрами $d_1 = 2 \cdot 10^{-2}$ м; і $d_2 = 1 \cdot 10^{-2}$ м та оснащений краном, коефіцієнт опору якого $\xi_{кр} = 3$.

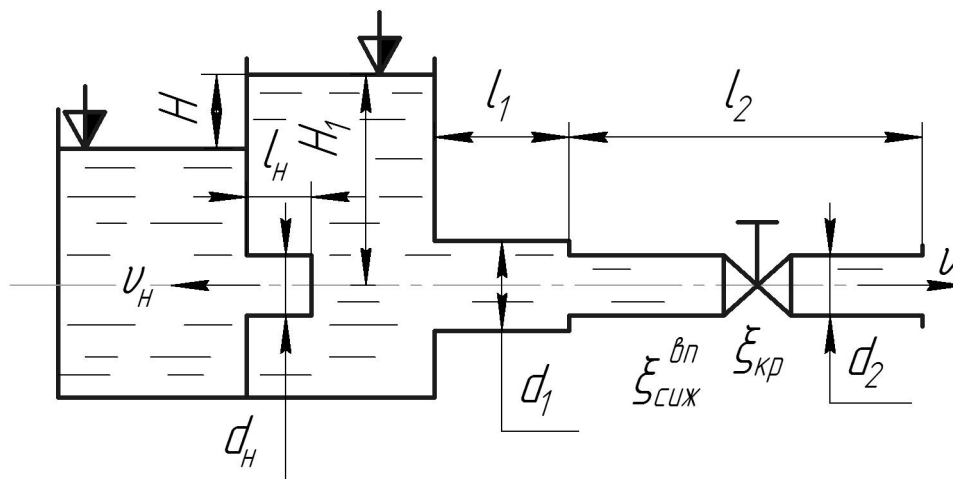


Рис. 8.1

Вода витікає у вільний простір по короткому трубопроводу під постійним напором $H_1 = 2,5$ м. З лівої сторони приєднаний внутрішній циліндричний насадок (насадок Борда) діаметром $d_H = 1 \cdot 10^{-2}$ м і довжиною $l_H = 5d_H$ з коефіцієнтом витрати $\mu_H = 0,71$. Коефіцієнти гідравлічного тертя відповідно $\lambda_1 = 0,025$; $\lambda_2 = 0,03$. Витікання відбувається при різниці рівнів в резервуарах $H = 1$ м.

Визначити: швидкість v і витрату Q води з короткого трубопроводу, витрату через насадок Q_H .

Рішення: При рішенні даних задач приймається, що діючий напір витрачається на подолання сумарних перешкод; тоді

$$H_1 = \frac{v_1^2}{2g} \left(\lambda_1 \frac{l_1}{d_1} + \sum \xi_{\Sigma 1} \right) + \frac{v_2^2}{2g} \left(\lambda_2 \frac{l_2}{d_2} + \sum \xi_{\Sigma 2} \right). \quad (1)$$

Оскільки значення швидкостей v_1 і v_2 невідомі, то використаємо для рішення умову нерозривності потоку рідини

$$Q_1 = Q_2 = v_1 \cdot S_1 = v_2 \cdot S_2; \text{ звідки } v_1 = \frac{v_2 S_2}{S_1}. \quad (2)$$

Підставивши даний вираз в (1), можна знайти швидкість на другій ділянці трубопроводу:

$$v_2 = \sqrt{\frac{2gH_1}{\frac{S_2^2}{S_1^2} \lambda_1 \frac{\ell_1}{d_1} + \lambda_2 \frac{\ell_2}{d_2} + \sum \xi_{31} + \sum \xi_{32}}}$$

Знайдемо невідомі складові даного рівняння.

$$S_1 = \frac{\pi d_1^2}{4} = 3,14 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2; S_2 = \frac{\pi d_2^2}{4} = 7,85 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2; \sum \xi_{31} = 0; \sum \xi_{32} = 3.$$

$$\text{Отже } v_2 = \sqrt{\frac{2 \cdot 9,81 \cdot 2,5}{\frac{(7,85 \cdot 10^{-4})^2}{(3,14 \cdot 10^{-4})^2} \cdot 0,025 \cdot \frac{5}{2 \cdot 10^{-2}} + 0,03 \cdot \frac{12}{1 \cdot 10^{-2}} + 3}}$$

$$v_2 = 1,116 \text{ м/с.}$$

Підставивши в (2), знайдемо швидкість рідини на першій ділянці

$$v_1 = \frac{1,116 \cdot 7,85 \cdot 10^{-4}}{3,14 \cdot 10^{-4}} = 0,28 \text{ м/с.}$$

Значення витрати знайдемо з виразу (2), наприклад, як

$$Q = Q_1 = v_1 \cdot S_1 = 0,28 \cdot 3,14 \cdot 10^{-4} = 8,76 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с.}$$

Витрату через насадок знайдемо як

$$Q_i = \mu_i S_i \sqrt{2 \cdot g \cdot H_{\text{ä.i.}}} ; \quad (3)$$

де $H_{\text{ä.i.}}$ - діючий напір над насадком. Для нашого випадку $H_{\text{ä.i.}} = H = 1 \text{ м.}$

Площа поперечного перерізу насадка

$$S_i = \frac{\pi d_i^2}{4} = 7,85 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с.}$$

Підставляючи в (3), отримаємо:

$$Q_i = 0,71 \cdot 7,85 \cdot 10^{-5} \cdot \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 1} = 3 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с.}$$

Задача № 8.2. До відкритого резервуару (рис. 8.2), на вільній поверхні якого діє манометричний тиск $p_m = 400 \text{ кПа}$, з правої сторони приєднаний трубопровід змінного перерізу з діаметрами $d_1 = 1,2 \cdot 10^{-2} \text{ м}$; і $d_2 = 2,5 \cdot 10^{-2} \text{ м}$. На першій ділянці довжиною $l_1 = 12 \text{ м}$ встановлений вентиль, коефіцієнт опору якого $\xi_{\text{в}} = 4$. Друга ділянка довжиною $l_2 = 6 \text{ м}$ закінчується соплом діаметром $d_c = d_1$ з кое-

фіцієнтом опору $\xi_c = 0,06$. З лівої сторони знаходиться затоплений конічний насадок з діаметром вихідного перерізу $d_n = 1,2 \cdot 10^{-2}$ м, витікання з якого відбувається при постійній різниці рівнів $H = 2,5$ м. Коефіцієнт витрати $\mu_n = 0,94$. Напір $H_1 = 8,5$ м.

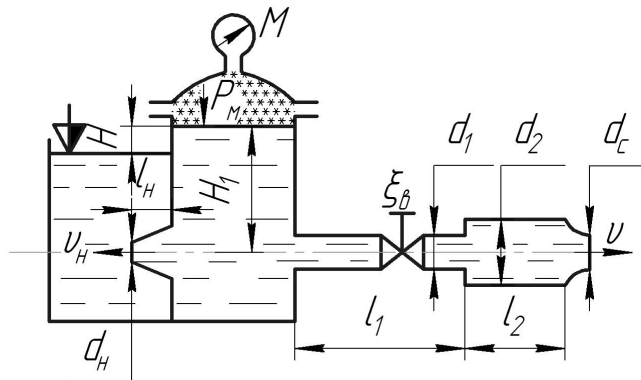


Рис. 8.2

Визначити:

1. Швидкість витікання води через сопло v_c і витрату Q_c .
2. Витрату води через затоплений насадок Q_n .

Відповідь: $v_c = 6,1$ м/с; $Q_c = 69,5$ м³/с; $Q_n = 32,2$ м³/с.

Задача № 8.3. Витікання рідини відбувається з відкритого резервуару (рис. 8.3) у вільний простір при постійному значенні напорі $H_1 = 9$ м по короткому трубопроводу змінного поперечного перерізу з діаметрами $d_1 = 4 \cdot 10^{-2}$ м; і $d_2 = 1 \cdot 10^{-2}$ м і довжинами $l_1 = 1,2$ м і $l_2 = 4$ м, для яких коефіцієнти гідравлічного тертя відповідно рівні $\lambda_1 = 0,04$; $\lambda_2 = 0,025$. На другому участку трубопроводу є два коліна з плавним поворотом та пониженням трубопроводу на $H_2 = 1,5$ м. Коефіцієнти опору колін $\xi_{1к} = \xi_{2к} = 0,15$; коефіцієнт опору заслінки $\xi_3 = 8$. Витікання з конічного насадку з діаметром вихідного перерізу $d_n = 2 \cdot 10^{-2}$ м і довжиною $l_n = 5d_n$ відбувається під рівень при постійній різниці рівнів $H = 3$ м. Коефіцієнт швидкості і коефіцієнт витрати рівні $\varphi_n = \mu_n = 0,45$.

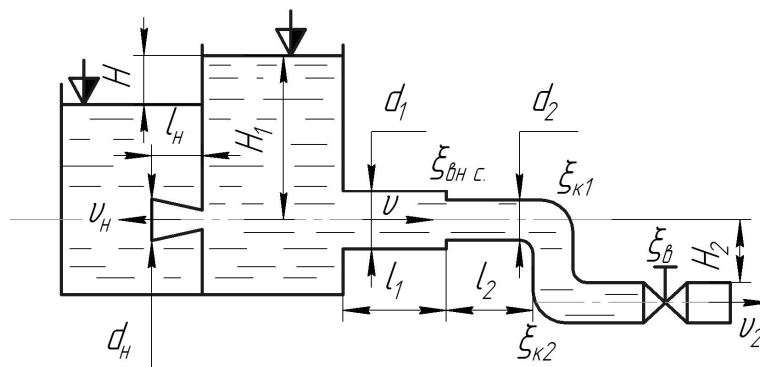


Рис. 8.3

Визначити:

1. Швидкість витікання $v_{тр}$ і витрату $Q_{тр}$ через короткий трубопровід.
 2. Швидкість витікання v_H і витрату Q_H через затоплений конічний насадок.
- Відповідь: $v_{тр} = 3,35$ м/с; $Q_{тр} = 26,3$ м³/с; $v_H = 4,9$ м/с; $Q_H = 15,3$ м³/с.

Задача № 8.4. З відкритого резервуару (рис. 8.4) по короткому трубопроводу постійного поперечного перерізу $d_1 = 1 \cdot 10^{-2}$ м і довжиною $l_1 = 5$ м, коефіцієнт опору якого $\xi_{кр} = 2,5$. На кінці трубопроводу є сопло діаметром $d_c = 0,5d_1$. Витікання відбувається під напором $H_1 = 8$ м. З іншої сторони до резервуару приєднаний колоїдальний насадок діаметром $d_H = 0,8 \cdot 10^{-2}$ м і довжиною $l_H = 5d_H$, витікання з якого відбувається при різниці рівнів в резервуарах $H = 2$ м. Коефіцієнт витрати насадка $\mu_H = 0,97$.

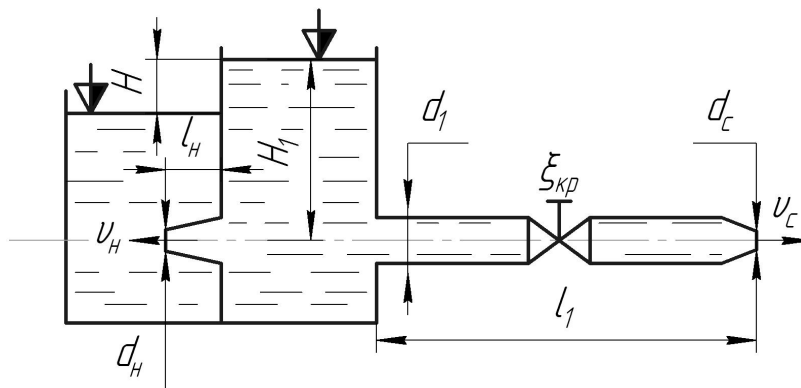


Рис. 8.4.

Визначити:

1. Швидкість витікання із сопла v_c і витрату води по короткому трубопроводу Q_c .
 2. Витрату води через затоплений колоїдальний насадок Q_H .
- Відповідь: $v_c = 12$ м/с; $Q_c = 23,5$ м³/с; $Q_H = 3$ м³/с.

Задача № 8.5. Вода з резервуару *A* (рис. 8.5) подається в резервуар *B* із швидкістю $v = 0,5$ м/с по сталюму трубопроводу діаметром $d_1 = 1 \cdot 10^{-2}$ м і довжиною $l_1 = 16$ м. Рівень води в баці *A* підтримується постійним $H_1 = 7$ м.

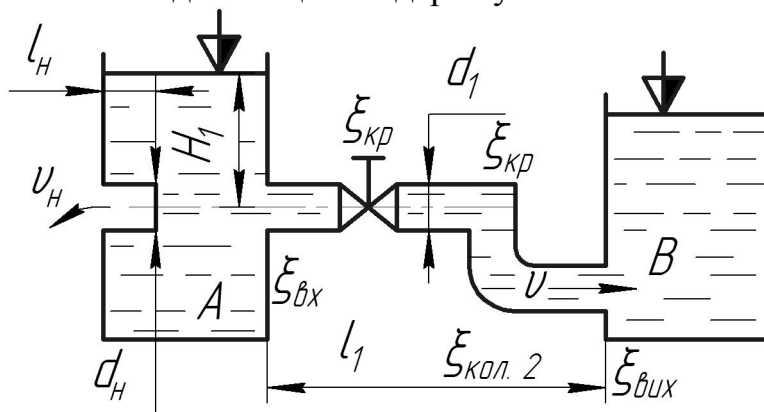


Рис. 8.5

Коефіцієнти опору рівні: входа в трубу $\xi_{\text{вх}} = 0,5$; крану $\xi_{\text{кр}} = 1,5$; коліна без заокруглення $\xi_{\text{кол-1}} = 0,25$; коліна із заокругленням $\xi_{\text{кол-2}} = 0,14$. На глибині H_1 до резервуару приєднаний внутрішній циліндричний насадок (насадок Борда) діаметром $d_n = 1 \cdot 10^{-2}$ м і довжиною $l_n = 5d_n$. Коефіцієнт швидкості для насадка $\varphi_n = 0,71$.

Визначити:

1. Час заповнення водою резервуару B об'ємом $V_B = 1,15 \text{ м}^3$ і втрати напору в трубопроводі.

2. Швидкість витікання води з насадка v_n .

Відповідь: час наповнення $t = 8 \text{ год. } 13 \text{ хв}$; $\sum H_{\hat{a}} = 0,6 \text{ м}$; $v_n = 8,3 \text{ м/с}$.

Задача № 8.6. З резервуару A (рис. 8.6), заповненого водою на висоту $H_1 = 5$ м з надмірним тиском на поверхні $p_m = 150 \text{ кПа}$, вода подається в резервуар B на висоту $H_2 = H_1 + H$ ($H = 1,5$ м) по трубопроводу довжиною $l_1 = 5$ м і діаметром $d_1 = 1 \cdot 10^{-2}$ м з коліном і заслінкою, коефіцієнт опору заслінки $\xi_z = 9$; кожного коліна із заокругленням $\xi_{\text{кол}} = 0,25$ при коефіцієнті гідравлічного тертя $\lambda_1 = 0,04$.

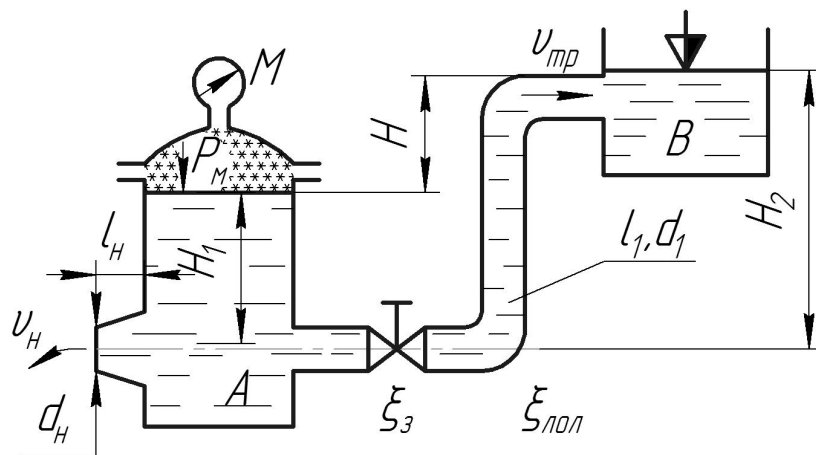


Рис. 8.6

До резервуару A на глибині $H_1 = 5$ м приєднаний конічний насадок, діаметр вихідного перерізу якого $d_n = 1 \cdot 10^{-2}$ м і довжиною $l_n = 5d_n$, витікання з якого відбувається у вільний простір з коефіцієнтами витрати $\mu_n = 0,94$ та швидкості $\varphi_n = 0,96$. Кінематичний коефіцієнт в'язкості води $\nu = 1,24 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$. Швидкісним напором та зміною рівня в баці A знехтувати.

Визначити:

1. Режим руху, витрату $Q_{\text{тр}}$ і швидкість рідини $v_{\text{тр}}$.

2. Швидкість v_n і витрату Q_n через конічний насадок.

Відповідь: $Re = 28500$ – турбулентний; $Q_{\text{тр}} = 28,8 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$; $v_{\text{тр}} = 3,53 \text{ м/с}$; $v_n = 18,4 \text{ м/с}$; $Q_n = 34 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$.

Задача № 8.7. З резервуара *A* (рис. 8.7), на вільній поверхні якого надмірний тиск $p_m = 200$ кПа вода, кінематичний коефіцієнт в'язкості якої $\nu = 1,24 \cdot 10^{-6}$ м²/с, подається в резервуар *B* по трубопроводу змінного перерізу, що складається із двох ділянок довжиною $l_1 = 105$ м і $l_2 = 14$ м та діаметрами $d_1 = 2 \cdot 10^{-2}$ м і $d_2 = 0,8 \cdot 10^{-2}$ м; із заслінкою $\xi_3 = 5$ і коліном $\xi_{1к} = 0,4$. Коефіцієнт опору на вході в трубу $\xi_{вх} = 0,5$. Коефіцієнти гідравлічного тертя $\lambda_1 = 0,025$; $\lambda_2 = 0,04$. Напір $H_1 = 3$ м; напір $H_2 = 6$ м. Різниця рівнів в резервуарах $H_2 = H_1 + H$.

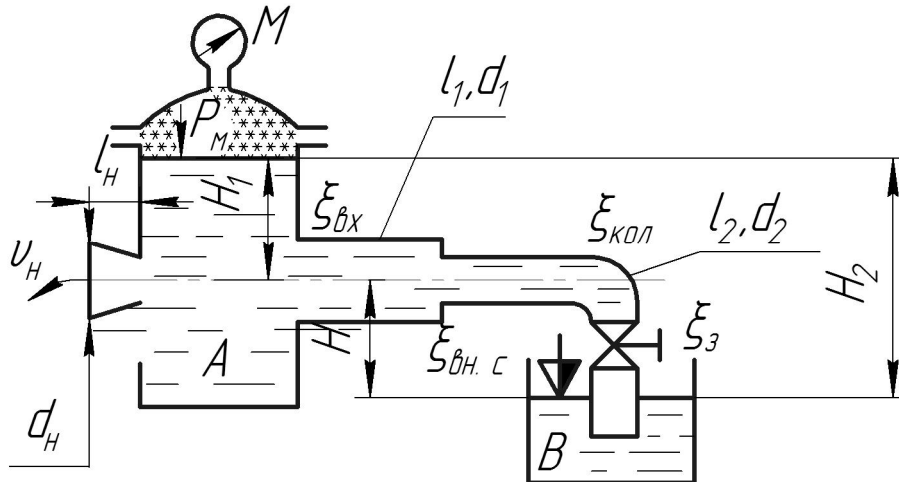


Рис. 8.7

На глибині H_1 до резервуару *A* приєднаний конічний насадок з діаметром вихідного перерізу d_n і довжиною $l_n = 5d_n$, витікання з якого відбувається у вільний простір з коефіцієнтом витрати та швидкості $\mu_n = \varphi_n = 0,45$. Швидкісним напором та зміною рівня води в резервуарі *A* знехтувати. Визначити:

1. Режим руху, швидкість $v_{тр}$ та витрату води $Q_{тр}$, яка поступає в резервуар *B* по трубопроводу.
2. Швидкість v_n та витрату води Q_n через конічний насадок.

Відповідь: $Re = 1,9 \cdot 10^4$ – турбулентний; $v_{тр} = 2,37$ м/с; $Q_{тр} = 12 \cdot 10^{-5}$ м³/с;
 $v_n = 10,2$ м/с; $Q_n = 32 \cdot 10^{-4}$ м³/с.

9. Розрахунок довгих трубопроводів

Задача № 9.1. Визначити витрату Q через трубопровід з неових сталевих труб діаметром $d = 200$ мм, довжиною $L = 1500$ м, якщо втрати напору становлять $H = 6$ м.

Рішення. Значення витрати можна знайти за формулою

$$Q = K \sqrt{I} = K \sqrt{\frac{H}{L}}.$$

З додатку 2 знаходимо $K = 0,379 \text{ м}^3/\text{с}$. Підставимо значення величин у формулу і одержимо

$$Q = 0,379 \sqrt{\frac{6}{1500}} = 0,024 \text{ м}^3/\text{с} = 24 \text{ л/с}.$$

Перевіримо, чи має місце квадратична область опору в трубопроводі, обчисливши середню швидкість руху рідини:

$$v = \frac{Q}{S} = \frac{4Q}{\pi d^2} = \frac{4 \cdot 0,024}{3,14 \cdot 0,2^2} = 0,76 \text{ м/с}.$$

Згідно додатку 3 $\beta = 1,07$.

Уточнимо значення витрати, використавши залежність

$$Q = K \sqrt{\frac{H}{\beta L}} = 0,379 \sqrt{\frac{6}{1,07 \cdot 1500}} = 0,0232 \text{ м}^3/\text{с} = 23,2 \text{ л/с}.$$

Задача № 9.2. Від напірного баку *A* (рис. 9.1) з горизонтом води на відмітці $H_A = 31,0 \text{ м}$ в пункт *B* подається вода з витратою $Q = 25,8 \text{ л/сек}$ по трубопроводу, розміри якого $L = 1520 \text{ м}$; $d = 200 \text{ мм}$. Труби сталеві, нові.

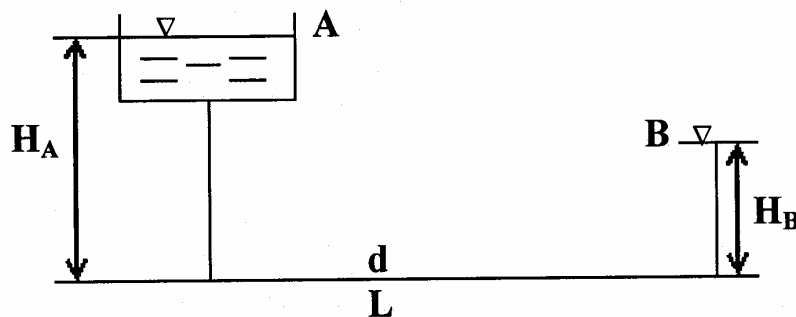


Рис. 9.1

Визначити:

- 1) Відмітку в пункті *B* – H_B , на яку підніметься вода.
- 2) Яку витрату Q_2 буде пропускати трубопровід при заданих розмірах і знайденій відмітці H_B (прийняти труби як сталеві, ненові). В обох випадках має місце перехідна область опору.

Рішення. 1). Знаходимо швидкість руху рідини

$$v = \frac{4Q}{\pi d^2} = \frac{4 \cdot 25,8 \cdot 10^{-3}}{3,14 \cdot 0,2^2} = 0,82 \text{ м/с}.$$

Для перехідної області опору модуль витрати трубопроводу можна визначити як $K_{\Pi} = K \cdot \theta_1$.

З додатку 4 для $d = 200$ мм значення $K = 398$ л/с.

З додатку 5 для $v = 0,82$ м/с значення $\theta_1 = 0,971$. Тоді $K_{\Pi} = 398 \cdot 0,971 = 386,46$ л/с або $386,85 \cdot 10^{-3}$ м³/с.

Знайдемо втрати напору

$$H = \frac{Q^2 \cdot L}{\hat{E}_i^2} = \frac{(25,8 \cdot 10^{-3})^2}{(386,46 \cdot 10^{-3})^2} \cdot 1520 = 6,77 \text{ м.}$$

Тоді відмітка в пункті В буде рівна $H_B = H_A - H = 31 - 6,77 = 24,23$ м.

Витрату Q_2 можна знайти як $Q_2 = K_2 \sqrt{\frac{H}{L}}$; де значення K_2 знаходимо з додатку 3 для ненових сталевих труб при $d = 200$ мм $K_2 = 0,379$ м³/с; тоді

$$Q_2 = 0,379 \sqrt{\frac{6,76}{1520}} = 0,0251 \text{ м}^3/\text{с.}$$

Уточнюємо значення витрати. При $v = 0,8$ м/с для ненових сталевих труб значення $\beta = 1,06$; тоді

$$Q_2 = K_2 \sqrt{\frac{H}{\beta L}} = 0,379 \sqrt{\frac{6,76}{1,06 \cdot 1520}} = 0,025 \text{ м}^3/\text{с} = 25 \text{ л/с.}$$

Задача № 9.3. Для показаної на рис. 9.2 схеми ділянки складного азбестоцементного трубопроводу визначити втрати напору H , якщо:

- а) $Q = 40$ л/с; $Q_B = 10$ л/с; $Q_C = 40$ л/с; $l_1 = l_2 = l_3 = 400$ м; $d_1 = 250$ мм; $d_2 = 200$ мм; $d_3 = 150$ мм;
б) $Q = 40$ л/с; $Q_B = Q_C = 0$.

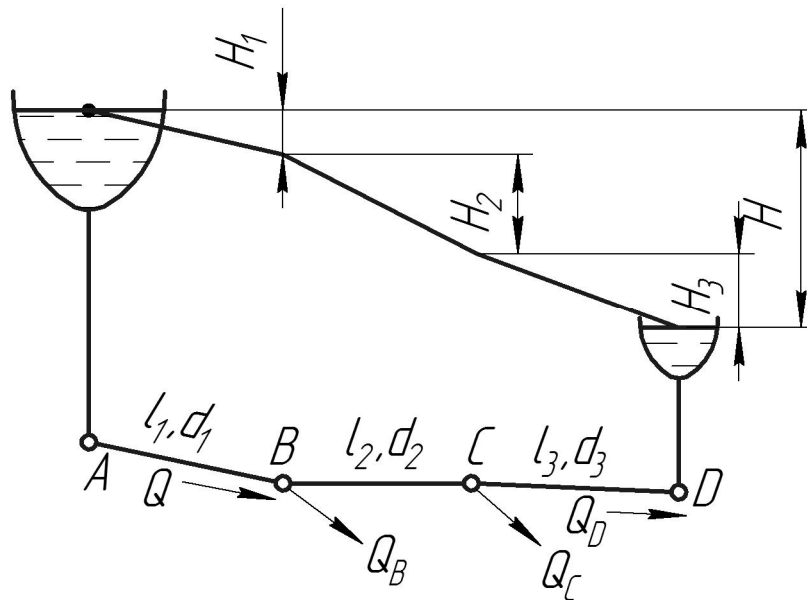


Рис. 9.2. Послідовне з'єднання довгих трубопроводів.

Рішення. Візьмемо з додатку 2 значення питомих опорів в залежності від діаметра кожної ділянки трубопроводу: $A_1 = 2,22 \text{ с}^2/\text{м}^6$; $A_2 = 7,89 \text{ с}^2/\text{м}^6$; $A_3 = 31,56 \text{ с}^2/\text{м}^6$.

Визначимо швидкості руху на кожній ділянці:

$$v_1 = \frac{4Q}{\pi d_1^2} = \frac{4 \cdot 0,04}{3,14 \cdot 0,25^2} = 0,81 \text{ м/с};$$

$$v_2 = \frac{4 \cdot 0,03}{3,14 \cdot 0,2^3} = 0,95 \text{ м/с};$$

$$v_3 = \frac{4 \cdot 0,015}{3,14 \cdot 0,15^2} = 0,85 \text{ м/с}.$$

З додатку 3 поправочні коефіцієнти на неквадратичність опору $\beta_1 = 1,034$; $\beta_2 = 1,008$; $\beta_3 = 1,025$.

Оскільки $A = 1/K^2$, то можна записати:

$$H = \beta_1 A_1 Q^2 l_1 + \beta_2 A_2 (Q - Q_B)^2 l_2 + \beta_3 A_3 (Q - Q_B - Q_C)^2 l_3 = 1,034 \cdot 2,22 \cdot 0,04^2 \cdot 400 + 1,008 \cdot 7,89 (0,04 - 0,01)^2 \cdot 400 + 1,025 \cdot 31,56 \cdot (0,04 - 0,01 - 0,015)^2 \cdot 400 = 7,24 \text{ м}$$

У випадку б) втрати напору:

$$H = Q^2 \sum_{i=1}^{n=3} \beta_i A_i l_i = Q^2 (\beta_1 A_1 l_1 + \beta_2 A_2 l_2 + \beta_3 A_3 l_3).$$

З додатку 3 необхідно знайти коефіцієнти β_2 і β_3 , тому що на цих ділянках швидкості збільшаться порівняно з випадком а) і становитимуть $v_2 = 1,27$ м/с, що відповідає $\beta_3 = 0,897$.

Підставивши в формулу ці дані, одержимо:

$$H = 0,04^2 \cdot (1,034 \cdot 2,22 + 0,966 \cdot 7,89 + 0,897 \cdot 31,56) \cdot 400 = 24,46 \text{ м.}$$

Задача № 9.4. З напірного баку (рис. 9.3) по трубах вода подається у водозабірні пункти A і B . Розміри труби до пункту A : $l_1 = 432$ м, $d_1 = 150$ мм, витрата $Q_A = 19,0$ л/сек. В пункті B витрата $Q_B = 38,0$ л/сек, $l_2 = 610$ м, $d_2 = 200$ мм. Визначити напори в пунктах A і B , якщо початковий напір в баці $H = 15,4$ м. Труби нормальні.

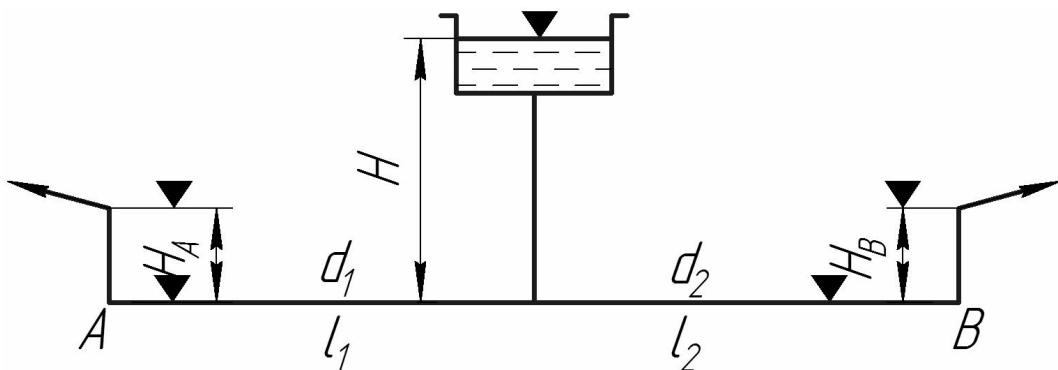


Рис. 9.3

Відповідь: $H_A = 9,18$ м; $H_B = 7,82$ м.

Задача № 9.5. Витрата $Q = 18,3$ л/сек з напірного баку A (рис. 9.4) подається в пункт D по трубопроводу, який має три послідовні з'єднані ділянки. Визначити відмітку горизонту в напірному баці A . Труби нові.

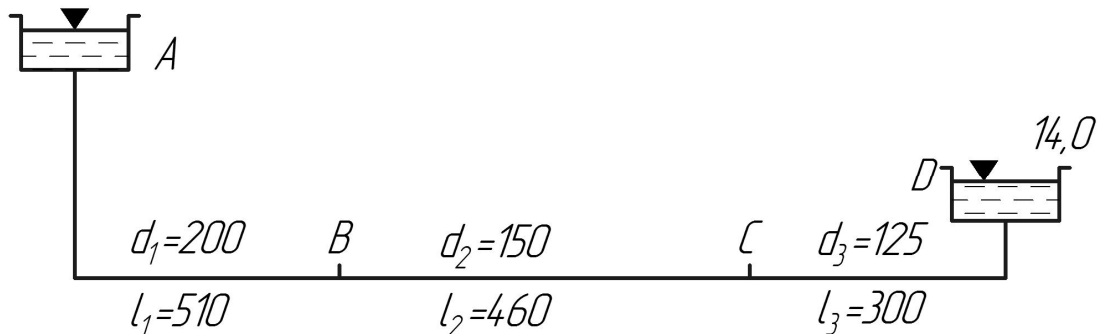


Рис. 9.4

Відповідь: відмітки пезометричної лінії: $H_A = 28,22$ м, $H_B = 26,96$ м, $H_C = 22,08$ м.

Задача № 9.6. Вода по трубопроводу, розміри якого показані на рис. 9.5 подається у водозабірні пункти B і C . В пункті B витрата $Q_B = 3$ л/сек. Визначити витрату Q_C в пункті C . Труби нормальні.

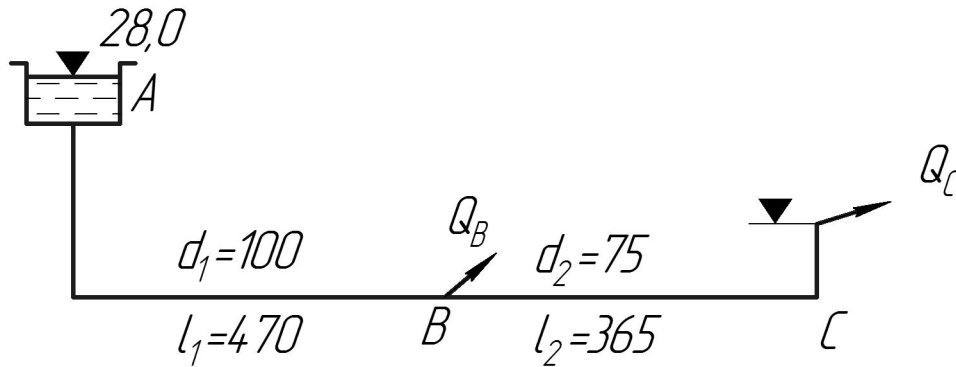


Рис. 9.5.

Відповідь: $Q_C = 2,40$ л/сек; відмітки п'езометричної лінії $H_A = 28,0$ м, $H_B = 22,85$ м, $H_C = 19,0$ м.

Задача № 9.7. В басейн A з напірного баку B через три паралельно з'єднаних трубопроводи подається витрата $Q = 48$ л/сек. Визначити необхідну відмітку горизонту води в баці B та витрати в кожному трубопроводі. Розміри труб вказані на рис. 9.6; труби нормальні. У всіх трьох трубах область опору не квадратична.

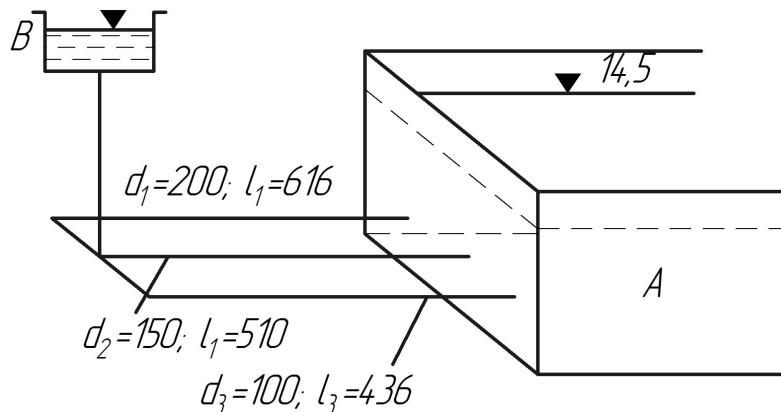


Рис. 9.6

Відповідь: $H_B = 19,0$ м, $Q_1 = 28,4$ л/сек, $Q_2 = 14,4$ л/сек, $Q_3 = 5,2$ л/сек.

Задача № 9.8. У водозабірні пункти B і C подаються однакові витрати води $Q_B = Q_C = 3,60$ л/сек. Розміри труб і відмітки рівня води в напірному баці A

показані на рис. 2.45. Визначити відмітки в пунктах B і C , на рівні яких будуть забезпечені задані витрати. Труби нормальні.

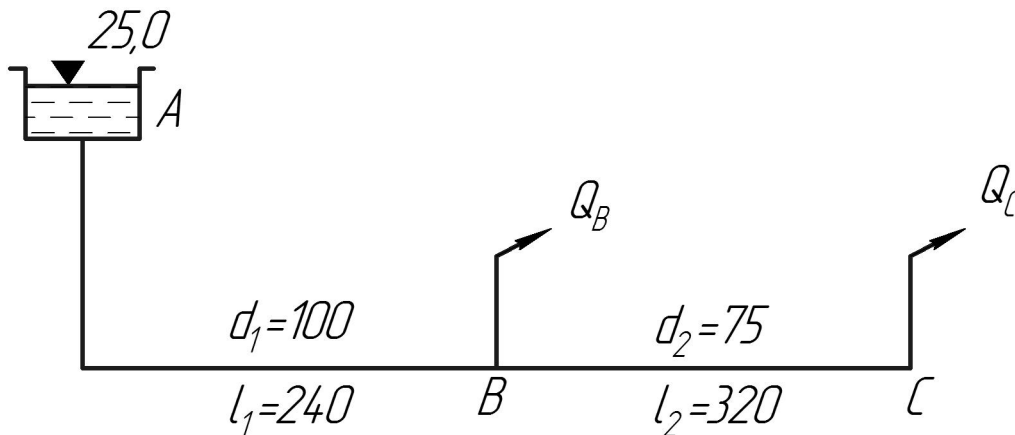


Рис. 9.7.

Відповідь: відмітки п'єзометричної лінії: в пункті B – 20,68 м; в пункті C – 13,92 м.

10. Розрахунок насосної установки

10.1. Задача-приклад

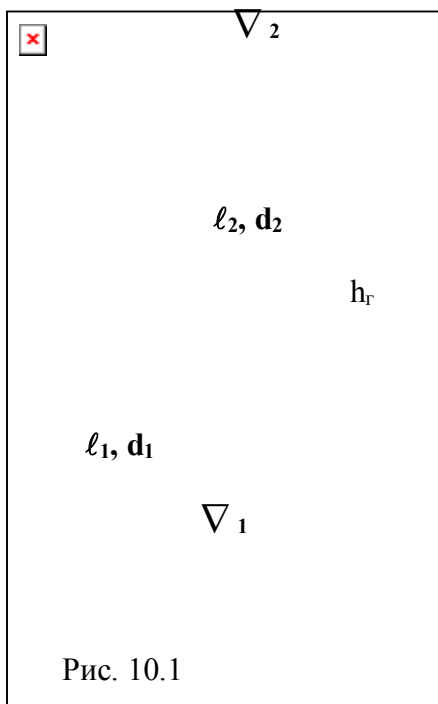


Рис. 10.1

Підібрати відцентровий насос, визначити роботу точку насосної установки, розрахувати потужність на вагу насосу, якщо відомо: $\nabla_1 = 30$ м, $\nabla_2 = 80$ м, $Q = 25$ л/с, $d_1 = 125$ мм, $l_1 = 10$ м, $d_2 = 100$ мм, $l_2 = 180$ м, температура води $t = 20$ °С. Шорсткість внутрішніх стінок трубопроводу $\Delta = 0,2$ мм. Місцеві втрати напору прийняти у всмоктувальному трубопроводі 100%, а в лінії нагнітання 5% від втрат напору на тертя по довжині трубопроводу. Коефіцієнт корисної дії насоса $\eta = 0,7$.

Рішення:

1. Визначимо втрати напору в лінії всмоктування. Швидкість

$$v_1 = \frac{4Q}{\pi d_1^2} = \frac{4 \times 25 \times 10^{-3}}{3,14 \times 0,125^2} = 2 \text{ м/с.}$$

Для визначення режиму руху рідини знаходимо значення кінематичного коефіцієнта в'язкості знаходимо з додатку 1 (для $t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ $\nu = 1 \times 10^{-6}\text{ м}^2/\text{с}$). Тоді

$$\text{Re}_1 = \frac{v_1 \times d_1}{\nu} = \frac{2 \times 0,125}{1 \times 10^{-6}} = 2,546 \times 10^5.$$

Визначимо вид турбулентного руху: $K_1 = \text{Re}_1 \times \frac{\Delta}{d_1} = 2,546 \times 10^5 \times \frac{0,2}{125} = 407.$

Оскільки значення $K_1 < 500$, то маємо 2 вид турбулентного руху, значення коефіцієнта тертя знаходимо за формулою Альтшуля:

$$\lambda_1 = 0,11 \left(\frac{68}{\text{Re}} + \frac{\Delta}{d_1} \right)^{0,25} = 0,023.$$

Визначимо втрати напору по довжині:

$$h_{l1} = \lambda_1 \frac{l_1}{d_1} \frac{v_1^2}{2g} = 0,023 \times \frac{10 \times 2^2}{2 \times 9,81} = 0,39\text{ м.}$$

По умові задачі місцеві втрати напору складають 100% від втрат напору по довжині, тому приймаємо $h_{i1} = 0,39\text{ м}$. Тоді сумарні втрати в лінії всмоктування визначимо як $\sum h_{a\tilde{n}} = h_{l1} + h_{i1} = 0,77\text{ м}$.

2. Визначимо втрати напору в лінії всмоктування. Швидкість

$$v_2 = \frac{4Q}{\pi d_2^2} = \frac{4 \times 25 \times 10^{-3}}{3,14 \times 0,1^2} = 3,18\text{ м/с.}$$

$$\text{Re}_2 = \frac{v_2 \times d_2}{\nu} = \frac{3,18 \times 0,1}{1 \times 10^{-6}} = 3,183 \times 10^5.$$

Визначимо вид турбулентного руху: $K_2 = \text{Re}_2 \times \frac{\Delta}{d_2} = 3,183 \times 10^5 \times \frac{0,2}{100} = 636.$

Оскільки значення $K_2 > 500$, то маємо 3 вид турбулентного руху, значення коефіцієнта тертя знаходимо за формулою Шифрінсона:

$$\lambda_2 = 0,11 \left(\frac{\Delta}{d_2} \right)^{0,25} = 0,023.$$

Визначимо втрати напору по довжині:

$$h_{l2} = \lambda_2 \frac{l_2}{d_2} \frac{v_2^2}{2g} = 0,023 \times \frac{180 \times 3,18^2}{2 \times 9,81} = 21,6\text{ м.}$$

По умові задачі місцеві втрати напору складають 5% від втрат напору по довжині, $h_{i2} = 21,6 \times 0,05 = 1,08\text{ м}$. Тоді сумарні втрати в лінії нагнітання визначимо як $\sum h_i = h_{l2} + h_{i2} = 22,7\text{ м}$.

3. Визначимо сумарні втрати напору в лініях всмоктування та нагнітання.

$$H_{\hat{a}} = \Sigma h_{\hat{a}\tilde{n}} + \Sigma h_i = 23,48 \text{ м.}$$

4. Визначаємо потрібний напір і підбираємо насос.

Геометричний напір: $h_r = \nabla 2 - \nabla 1 = 50 \text{ м.}$

Потрібний напір: $\dot{I}_{\tilde{i}\hat{o}\hat{\delta}} = \dot{I}_{\hat{a}} + h_{\hat{a}} = 73,48 \text{ м.}$ Приймаємо $\dot{I}_{\tilde{i}\hat{o}\hat{\delta}} = 74 \text{ м.}$

Використовуючи значення витрати $Q = 25 \text{ л/с}$ та знайденого потрібного напору, підбираємо насос К 90/85. Характеристики насосу заносимо в таблицю.

H, м	100	90	70	60	50
Q, л/с	17	25	38	45	48
Q, м ³ /с	0,017	0,025	0,038	0,045	0,048

5. Будуємо характеристику трубопроводу.

$$\dot{I}_{\hat{o}\hat{\delta}} = h_{\hat{a}} + \tilde{N}Q^2,$$

де \tilde{N} – питомий опір трубопроводу, який знаходимо як:

$$\tilde{N} = \left(\lambda_1 \frac{l_1}{d_1} + \Sigma \xi_1 \right) \frac{1}{\pi^2 g d_1^4} + \left(\lambda_2 \frac{l_2}{d_2} + \Sigma \xi_2 \right) \frac{1}{\pi^2 g d_2^4} = \left(0,023 \times \frac{10}{0,125} + 1,8 \right) \times$$

$$\times \frac{1}{3,14^2 \times 9,81 \times 0,125^4} + \left(0,023 \times \frac{180}{0,1} + 2,1 \right) \times \frac{1}{3,14^2 \times 9,81 \times 0,1^4}$$

$\tilde{N} = 4,696 \times 10^3 \text{ с}^2/\text{м}^5$. Тоді характеристика трубопроводу описується таким співвідношенням: $H_{mp} = 50 + 4,696 \cdot 10^3 \cdot Q^2$. Послідовно задаючись значеннями витрати Q , знаходимо значення $H_{тр}$.

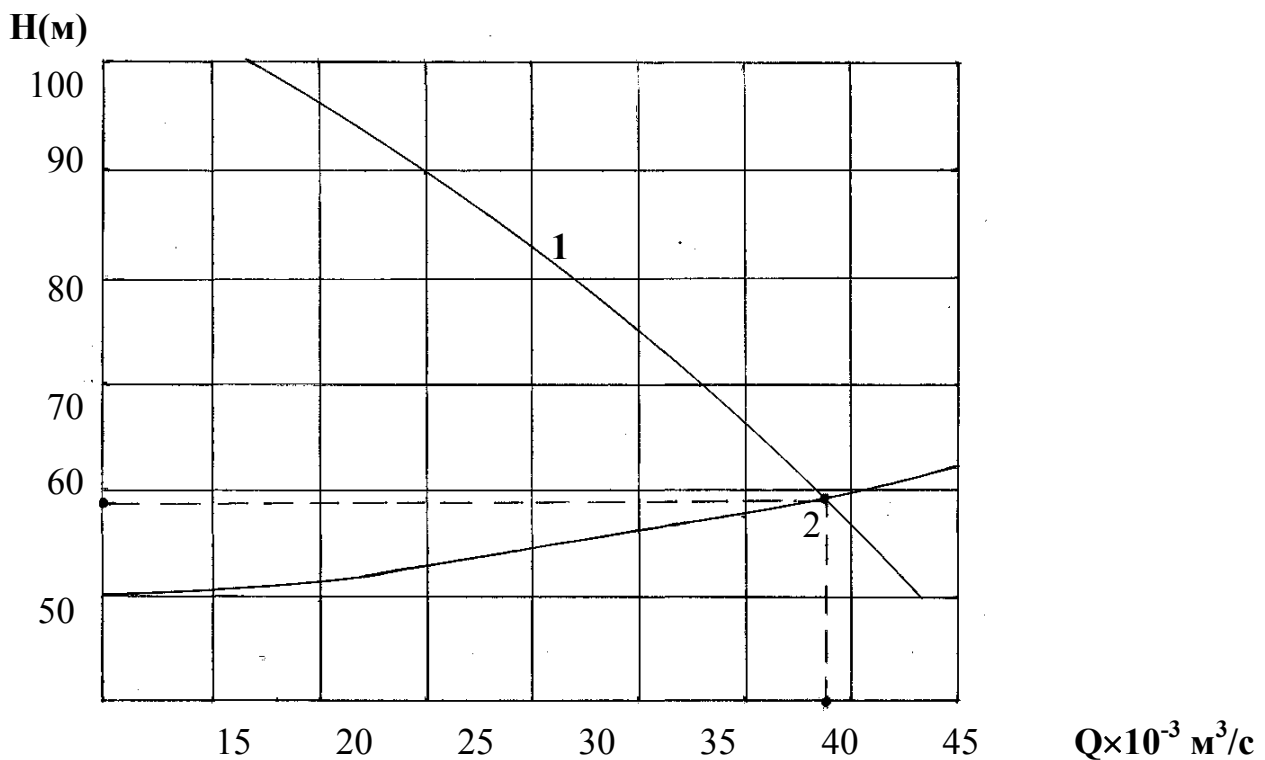
В масштабі будуємо графіки - характеристику насоса (крива 1) та характеристику трубопроводу (крива 2).

Знаходимо точку перетину цих кривих та визначаємо параметри робочої точки:

$$Q_p = 44 \times 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}; H_p = 59 \text{ м.}$$

Визначаємо потрібну потужність на валу насоса:

$$N_i = \frac{\gamma \times Q_p \times H_p}{\eta} = \frac{9810 \times 44 \times 10^{-3} \times 59}{0,7} = 36381 \text{ Вт} = 36,3 \text{ кВт.}$$



Варіанти розрахунково-графічного завдання

Однакові дані для всіх віриантів: шорсткість внутрішніх стінок трубопроводу $\Delta = 0,2$ мм; місцеві втрати напору прийняти у всмоктувальному трубопроводі 100%, а в лінії нагнітання 5% від втрат напору на тертя по довжині трубопроводу; коефіцієнт корисної дії насосу $\eta = 0,7$.

№ завдання	Q (л/с)	$h_{\tilde{a}}$ (м)	$l_{вс}$ (мм);	$d_{вс}$ (мм);	$l_{н}$ (мм);	$d_{н}$ (мм)	$t, ^\circ\text{C}$
01	35	40	20	0,15	100	0,1	14
02	40	35	30	0,125	110	0,1	20
03	45	30	40	0,15	120	0,15	18
04	50	25	20	0,1	130	0,15	20
05	35	40	30	0,125	140	0,15	15
06	40	35	40	0,125	100	0,15	18
07	45	30	20	0,1	110	0,15	20
08	50	25	30	0,1	120	0,15	14
09	45	35	40	0,1	130	0,15	20
10	40	30	20	0,1	140	0,1	18
11	45	25	30	0,1	100	0,1	20

12	40	40	40	0,1	110	0,15	15
13	35	35	20	0,1	120	0,15	18
14	40	30	30	0,1	130	0,15	20
15	45	25	40	0,1	140	0,15	14
16	50	35	20	0,1	100	0,15	20
17	45	30	30	0,1	110	0,15	18
18	50	25	40	0,1	120	0,15	20
19	25	40	20	0,1	130	0,1	15
20	40	35	30	0,1	140	0,1	18
21	45	30	40	0,1	100	0,15	20
22	50	25	40	0,1	110	0,15	14
23	35	45	20	0,1	120	0,15	20
24	40	30	30	0,1	130	0,15	18
№ завдання	Q (л/с)	$h_{\tilde{a}}$ (м)	$l_{bc},$ (мм);	$d_{bc},$ (мм);	$l_H,$ (мм);	$d_H,$ (мм)	t, °C
25	40	40	30	0,1	100	0,15	15
26	45	35	40	0,1	110	0,15	18
27	25	50	20	0,15	150	0,1	14
28	30	45	10	0,125	180	0,1	20
29	35	40	15	0,15	200	0,15	18
30	40	35	20	0,1	100	0,15	20
31	25	50	15	0,125	130	0,15	15
32	30	45	20	0,125	140	0,15	18
33	35	40	10	0,1	150	0,15	20
34	40	35	15	0,1	180	0,15	14
35	25	45	20	0,1	200	0,15	20
36	30	40	15	0,1	100	0,1	18
37	35	35	20	0,1	130	0,1	20
38	40	50	10	0,1	140	0,15	15
39	25	45	15	0,1	150	0,15	18
40	30	40	20	0,1	180	0,15	20

41	35	35	15	0,1	200	0,15	14
42	40	45	20	0,1	100	0,15	20
43	35	40	10	0,1	130	0,15	18
44	40	35	15	0,1	140	0,15	20
45	25	50	20	0,1	150	0,1	15
46	30	45	15	0,1	180	0,1	18
47	35	40	20	0,1	200	0,15	20
48	40	35	10	0,1	100	0,15	14
49	25	45	15	0,1	130	0,15	20
50	30	40	20	0,1	140	0,15	18
51	35	35	15	0,1	150	0,15	20
52	30	50	20	0,1	180	0,15	15
53	35	45	10	0,1	200	0,15	18
№ завдання	Q (л/с)	$h_{\tilde{a}}$ (м)	$l_{bc},$ (мм);	$d_{bc},$ (мм);	$l_H,$ (мм);	$d_H,$ (мм)	t, °C
25	40	40	30	0,1	100	0,15	15
26	45	35	40	0,1	110	0,15	18
27	25	50	20	0,15	150	0,1	14
28	30	45	10	0,125	180	0,1	20
29	35	40	15	0,15	200	0,15	18
30	40	35	20	0,1	100	0,15	20
31	25	50	15	0,125	130	0,15	15
32	30	45	20	0,125	140	0,15	18
33	35	40	10	0,1	150	0,15	20
34	40	35	15	0,1	180	0,15	14
35	25	45	20	0,1	200	0,15	20
36	30	40	15	0,1	100	0,1	18
37	35	35	20	0,1	130	0,1	20
38	40	50	10	0,1	140	0,15	15
39	25	45	15	0,1	150	0,15	18
40	30	40	20	0,1	180	0,15	20

41	35	35	15	0,1	200	0,15	14
42	40	45	20	0,1	100	0,15	20
43	35	40	10	0,1	130	0,15	18
44	40	35	15	0,1	140	0,15	20
45	25	50	20	0,1	150	0,1	15
46	30	45	15	0,1	180	0,1	18
47	35	40	20	0,1	200	0,15	20
48	40	35	10	0,1	100	0,15	14
49	25	45	15	0,1	130	0,15	20
50	30	40	20	0,1	140	0,15	18
51	35	35	15	0,1	150	0,15	20
52	30	50	20	0,1	180	0,15	15
53	35	45	10	0,1	200	0,15	18
№ завдання	Q (л/с)	$h_{\tilde{a}}$ (м)	$l_{bc},$ (мм);	$d_{bc},$ (мм);	$l_H,$ (мм);	$d_H,$ (мм)	t, °C
54	50	40	30	0,1	100	0,15	15
55	55	35	40	0,1	110	0,15	18
56	55	50	20	0,15	150	0,1	14
57	30	45	10	0,125	180	0,1	20
58	55	40	15	0,15	200	0,15	18
59	50	35	20	0,1	100	0,15	20
60	55	50	15	0,125	130	0,15	15
61	50	45	20	0,125	140	0,15	18
62	55	40	10	0,1	150	0,15	20
63	50	35	15	0,1	180	0,15	14
64	55	45	20	0,1	200	0,15	20
65	50	40	15	0,1	100	0,1	18
66	55	35	20	0,1	130	0,1	20
67	50	50	10	0,1	140	0,15	15
68	55	45	15	0,1	150	0,15	18
69	50	40	20	0,1	180	0,15	20

70	55	35	15	0,1	200	0,15	14
71	50	45	20	0,1	100	0,15	20
72	55	40	10	0,1	130	0,15	18
73	50	35	15	0,1	140	0,15	20
74	55	50	20	0,1	150	0,1	15
75	50	45	15	0,1	180	0,1	18
76	55	40	20	0,1	200	0,15	20
77	50	35	10	0,1	100	0,15	14
78	55	45	15	0,1	130	0,15	20
79	50	40	20	0,1	140	0,15	18
80	55	35	15	0,1	150	0,15	20
81	50	50	20	0,1	180	0,15	15
82	55	45	10	0,1	200	0,15	18
№ завдання	Q (л/с)	$h_{\tilde{a}}$ (м)	$l_{bc},$ (мм);	$d_{bc},$ (мм);	$l_H,$ (мм);	$d_H,$ (мм)	t, °C
83	30	45	30	0,2	100	0,15	15
84	35	40	40	0,2	110	0,15	18
85	40	35	20	0,25	150	0,1	14
86	35	45	10	0,125	180	0,1	20
87	40	40	15	0,25	200	0,15	18
88	25	35	20	0,2	100	0,15	20
89	30	50	15	0,2	130	0,15	15
90	35	45	20	0,125	140	0,15	18
91	40	40	10	0,2	150	0,15	20
92	25	35	15	0,2	180	0,15	14
93	30	45	20	0,2	200	0,15	20
94	35	40	15	0,2	100	0,1	18
95	30	35	20	0,2	130	0,1	20
96	40	50	10	0,2	140	0,15	15
97	25	45	15	0,2	150	0,15	18
98	30	40	20	0,2	180	0,15	20

99	35	35	15	0,2	200	0,15	14
100	40	45	20	0,2	100	0,15	20
101	35	40	10	0,2	130	0,15	18
102	40	35	15	0,2	140	0,15	20
103	25	50	20	0,2	150	0,1	15
104	30	45	15	0,2	180	0,1	18
105	35	40	20	0,2	200	0,15	20
106	40	35	10	0,2	100	0,15	14
107	25	45	15	0,2	130	0,15	20
108	30	40	20	0,2	140	0,15	18
109	35	35	15	0,2	150	0,15	20
110	30	50	20	0,2	180	0,15	15

11. Розрахунок трубопроводів при наявності гідравлічного удару

Задача № 11.1. Провести перевірку на міцність сталюї труби діаметром $d = 200$ мм, в якій можливий прямий гідравлічний удар. Товщина стінок труби $\delta = 4$ мм, допустиме напруження на розтяг $[\sigma] = 140$ МПа, швидкість руху води $v_0 = 5$ м/с, тиск до удару $p_0 = 0,25$ МПа.

Рішення. Знайдемо швидкість розповсюдження ударної хвилі

$$C = \sqrt{\frac{E_\delta}{\rho \left(1 + \frac{E_\delta d}{E_i \delta} \right)}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 10^9}{10^3 \left(1 + \frac{2 \cdot 10^9 \cdot 200}{2 \cdot 10^{11} \cdot 4} \right)}} = 1150 \text{ м/с},$$

З додатку 6 $E_p = 2 \cdot 10^9$ Па – об'ємний модуль пружності води; $\rho = 1000$ кг/м³ – густина води; $E_m = 2 \cdot 10^{11}$ Па – модуль пружності сталі.

Визначимо підвищення тиску при гідроударі

$$\Delta p = \rho v_0 c = 1000 \cdot 5 \cdot 1150 = 5,75 \cdot 10^6 \text{ Па} = 5,75 \text{ МПа}.$$

Тоді повний тиск в рідині буде рівним

$$p = p_0 + \Delta p = 0,25 + 5,75 = 6 \text{ МПа}$$

Напруження в стінках труби знайдемо як

$$\sigma = \frac{pd}{2\delta} = \frac{6 \cdot 200}{2 \cdot 4} = 150 \text{ МПа} > 140 \text{ МПа}.$$

Отже, міцність трубопроводу недостатня.

Задача № 11.2. Визначити підвищення тиску в напірному трубопроводі у випадках прямого і непрямого гідравлічних ударів при $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$; $v_0 = 1 \text{ м/с}$; $C = 1000 \text{ м/с}$; $p_0 = 40 \text{ кПа}$; $l = 200 \text{ м}$; час закриття заслінки $t_3 = 4 \text{ с}$.

Рішення. У випадку прямого гідравлічного удару

$$\Delta p = \rho c v_0 = 1000 \cdot 1000 \cdot 1 = 1 \cdot 10^6 \text{ Па} = 1 \text{ МПа}.$$

Для непрямого удару

$$t_0 = \frac{2l}{c} = \frac{2 \cdot 200}{1000} = 0,4 \text{ с} < t_3 = 4 \text{ с};$$

де t_3 – час закриття засувки.

Тоді безрозмірний коефіцієнт визначаємо як

$$k = \frac{\rho l v_0}{p_0 t_3} = \frac{1000 \cdot 200 \cdot 1}{40000 \cdot 4} = 1,25;$$

$$\Delta \delta = \frac{2k}{2-k} \cdot p_0 = \frac{2 \cdot 1,25}{2-1,25} \cdot 40000 = 133500 \text{ Па} = 133,5 \text{ кПа}.$$

Задача № 11.3. Визначити швидкість c розповсюдження ударної хвилі і підвищення тиску $\Delta p_{\text{макс}}$ в дерев'яному трубопроводі при миттєвому закритті заслінки. Діаметр $d = 250 \text{ мм}$, товщина стінок трубопроводу $\delta = 20 \text{ мм}$, швидкість руху рідини $v_0 = 0,95 \text{ м/сек}$.

Відповідь: $c = 762 \text{ м/сек}$; $\Delta p_{\text{макс}} = 726 \text{ кН/м}^2$.

Задача № 11.4. З напірного резервуару по трубопроводу поступає рідина з витратою $Q = 32,0 \text{ л/сек}$. Трубопровід чавунний, $d = 200 \text{ мм}$, $\delta = 6 \text{ мм}$. Початковий тиск $p = 785 \text{ кН/м}^2$.

При миттєвому закритті заслінки визначити:

а) напруження σ в стінках трубопроводу, якщо рідина – вода;

б) максимальне підвищення тиску $\Delta p_{\text{макс}}$, якщо рідина – нафта ($\gamma_{\text{н}} = 8830 \text{ н/м}^3$).

Відповідь: $\sigma = 20100 \text{ кн/м}^2$; $\Delta p_{\text{макс}} = 924 \text{ кн/м}^2$.

Задача № 11.5. Визначити напруження σ в стінках дерев'яного трубопроводу при миттєвому закритті заслінки. Початковий тиск в трубопроводі $p_0 = 5,8 \text{ н/см}^2$, початкова швидкість рідини $v_0 = 1,15 \text{ м/сек}$, $d = 300 \text{ мм}$, $\delta = 25 \text{ мм}$.
Відповідь: $\sigma = 5680 \text{ кн/м}^2$.

Задача № 11.6. Визначити, при якій початковій швидкості v_0 руху рідини в трубопроводі тиск при миттєвому закритті заслінки досягне $p = 147 \text{ н/см}^2$. Трубопровід чавунний; $d = 250 \text{ мм}$, $\delta = 6 \text{ мм}$, тиск перед закриттям заслінки $p_0 = 118 \text{ кн/м}^2$.

Відповідь: $v_0 = 1,29 \text{ м/сек}$.

Задача № 11.7. Визначити товщину δ стінок чавунного трубопроводу, щоб напруження в них від додаткового тиску при миттєвому закритті засувки не перевищувало $\sigma = 14700 \text{ кн/м}^2$. Діаметр трубопроводу $d = 300 \text{ мм}$. Швидкість руху води до закриття засувки $v_0 = 1,50 \text{ м/сек}$.

Відповідь: $\delta = 19 \text{ мм}$.

Задача № 11.8. Визначити, через який час після миттєвого закриття засувки на трубопроводі підвищений тиск $\Delta p_{\text{макс}}$ досягне перерізу, що знаходиться на відстані 580 м від засувки. Знайти величину цього тиску, якщо діаметр трубопроводу $d = 250 \text{ мм}$, $\delta = 5 \text{ мм}$, витрата рідини $Q = 81,0 \text{ л/сек}$. Трубопровід сталевий. Вирішити для двох умов: а) рідина – вода, б) рідина – нафта ($\gamma = 8830 \text{ н/м}^3$).

Відповідь: а) $t = 0,5 \text{ сек}$, $\Delta p_{\text{макс}} = 1920 \text{ кн/м}^2 \text{ ат}$; б) $t = 0,56 \text{ сек}$, $\Delta p_{\text{макс}} = 1550 \text{ кн/м}^2$.

Задача № 11.9. По бетонному трубопроводу, довжина якого $l = 964 \text{ м}$, $d = 350 \text{ мм}$, $\delta = 40 \text{ мм}$, пропускається вода з витратою $Q = 0,080 \text{ м}^3/\text{сек}$. Початковий надмірний тиск перед засувкою $p_0 = 19,62 \text{ н/см}^2$. Визначити, який буде тиск при раптовому закритті засувки, що розташована в кінці трубопроводу. Через який час t цей тиск перейде до напірного резервуару?

Відповідь: $p = 1060 \text{ кн/м}^2$; $t = 0,93 \text{ сек}$.

Задача № 11.10. Визначити підвищення тиску при гідравлічному ударі (Па), якщо відомо: густина води $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$, початкова швидкість $v_0 = 5 \text{ м/сек}$, внутрішній діаметр трубопроводу $d = 200 \text{ мм}$, товщина стінки трубопроводу $\delta = 4 \text{ мм}$, об'ємний модуль пружності води $E_{\text{в}} = 2 \times 10^9 \text{ Па}$, модуль пружності сталі $E_{\text{ст}} = 2 \times 10^{11} \text{ Па}$.

Відповідь: $\Delta p = 5,82 \times 10^6$ Па.

Задача № 11.11. Визначити підвищення тиску при гідравлічному ударі (Па), якщо відомо: густина води $\rho = 1000$ кг/м³, початкова швидкість $v_0 = 6$ м/сек, внутрішній діаметр трубопровода $d = 250$ мм, товщина стінки трубопровода $\delta = 5$ мм, об'ємний модуль пружності води $E_v = 2 \times 10^9$ Па, модуль пружності сталі $E_{ст} = 2 \times 10^{11}$ Па.

Відповідь: $\Delta p = 7 \times 10^6$ Па.

Задача № 11.12. Визначити підвищення тиску при гідравлічному ударі (Па), якщо відомо: густина води $\rho = 1000$ кг/м³, початкова швидкість $v_0 = 7$ м/сек., внутрішній діаметр трубопровода $d = 300$ мм, товщина стінки трубопровода $\delta = 6$ мм, об'ємний модуль пружності води $E_v = 2 \times 10^9$ Па, модуль пружності сталі $E_{ст} = 2 \times 10^{11}$ Па.

Відповідь: $\Delta p = 8,14 \times 10^6$ Па.

Задача № 11.13. Визначити підвищення тиску при гідравлічному ударі (Па), якщо відомо: густина води $\rho = 1000$ кг/м³, початкова швидкість $v_0 = 8$ м/сек., внутрішній діаметр трубопровода $d = 200$ мм, товщина стінки трубопровода $\delta = 7$ мм, об'ємний модуль пружності води $E_v = 2 \times 10^9$ Па, модуль пружності сталі $E_{ст} = 2 \times 10^{11}$ Па.

Відповідь: $\Delta p = 1 \times 10^7$ Па.

Задача № 11.14. Визначити підвищення тиску при гідравлічному ударі (Па), якщо відомо: густина води $\rho = 1000$ кг/м³, початкова швидкість $v_0 = 9$ м/сек, внутрішній діаметр трубопровода $d = 250$ мм, товщина стінки трубопровода $\delta = 8$ мм, об'ємний модуль пружності води $E_v = 2 \times 10^9$ Па, модуль пружності сталі $E_{ст} = 2 \times 10^{11}$ Па.

Відповідь: $\Delta p = 1,1 \times 10^7$ Па.

Задача № 11.15. Провести перевірку на міцність стінок трубопровода при гідравлічному ударі (знайти значення напруження σ , МПа), якщо відомо: повний тиск при гідроударі $p = 6$ МПа, внутрішній діаметр трубопровода $d = 200$ мм, товщина стінки трубопровода $\delta = 4$ мм, допустиме напруження матеріалу стінки трубопровода на розтяг $[\sigma] = 180$ МПа.

Відповідь: $\sigma = 150$ МПа.

Задача № 11.16. Провести перевірку на міцність стінок трубопровода при гідравлічному ударі (знайти значення напруження σ , МПа), якщо відомо: повний тиск при гідроударі $p = 7$ МПа, внутрішній діаметр трубопровода $d = 250$ мм, товщина стінки трубопровода $\delta = 5$ мм, допустиме напруження матеріалу стінки трубопровода на розтяг $[\sigma] = 180$ МПа.

Відповідь: $\sigma = 175$ МПа.

Задача № 11.17. Провести перевірку на міцність стінок трубопроводу при гідравлічному ударі (знайти значення напруження σ , МПа), якщо відомо: повний тиск при гідроударі $p = 8$ МПа, внутрішній діаметр трубопроводу $d = 300$ мм, товщина стінки трубопроводу $\delta = 6$ мм, допустиме напруження матеріалу стінки трубопроводу на розтяг $[\sigma] = 180$ МПа.

Відповідь: $\sigma = 200$ МПа.

Задача № 11.18. Провести перевірку на міцність стінок трубопроводу при гідравлічному ударі (знайти значення напруження σ , МПа), якщо відомо: повний тиск при гідроударі $p = 9$ МПа, внутрішній діаметр трубопроводу $d = 200$ мм, товщина стінки трубопроводу $\delta = 7$ мм, допустиме напруження матеріалу стінки трубопроводу на розтяг $[\sigma] = 180$ МПа.

Відповідь: $\sigma = 128$ МПа.

РОЗДІЛ II. ТЕПЛОТЕХНІКА

1 Технічна термодинаміка

Задача 1. Циліндр діаметром $d = 200$ мм щільно закритий, у ньому розміщено поршень, який закріплено до пружини (вважаємо, що він є невагомий і переміщається без тертя). У циліндрі створюють розрідження, яке дорівнює 90% від барометричного тиску $P_b = 1,02$ бар. Визначити силу F натягу пружини, коли поршень нерухомий.

Значення величин для інших варіантів наведено в таблиці 1.1:

Таблиця 1.1

Величини	1	2	3	4	5	6	7	8	9
d , мм	220	240	200	230	180	260	280	160	140
P_p , %	82	88	90	92	82	80	86	78	84

Розв'язання

Розрідження в циліндрі:

$$P_p = P_b \cdot 0.9 = 1,02 \cdot 0,9 = 0,918 \text{ бар.}$$

Площа поршня:

$$S = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{3,14 \cdot (0,2)^2}{4} = 0,0314 \text{ м}^2$$

Сила F натягу пружини:

$$F = P \cdot S = 0,918 \cdot 10^5 \cdot 0,0314 = 2882,52 \text{ Н}$$

Задача 2. Визначити абсолютний тиск пари в котлі, якщо манометр показує тиск $P_m = 0,07$ МПа, атмосферний тиск за ртутним барометром дорівнює $P_b = 700$ мм рт. ст. при $t = 25$ °С.

Значення величин для інших варіантів наведено в табл. 1.2:

Таблиця 1.2

Величини	1	2	3	4	5	6	7	8
P_m , МПа	0,08	0,82	0,9	0,40	0,5	0,6	0,12	0,18
P_b , мм рт.ст.	700	710	720	730	740	750	680	690

Визначаємо абсолютний тиск.

Покази барометра отримано при температурі ртуті $t = 25 \text{ }^\circ\text{C}$.

Ці покази необхідно звести до $0 \text{ }^\circ\text{C}$.

$$P_v = 700 (1 - 0,000172 \cdot 25) = 696,99 \text{ мм рт.ст.}$$

Перераховуємо значення P_b у МПа.

$$P_{v,} = 696,99/7500 = 0,092 \text{ МПа}$$

$$P = 0,07 + 0,092 = 0,162 \text{ МПа}$$

Задача 3. Визначити абсолютний тиск (Па) газів у палильній котла, якщо вакуумметр показує розрідження $P_r = 500$ мм од. ст., атмосферний тиск за ртутним барометром дорівнює $P_v = 700$ мм. рт.ст. при $t = 30 \text{ }^\circ\text{C}$.

Значення величин для інших варіантів наведено в табл. 1.3

Таблиця 1.3

Величини	1	2	3	4	5	6	7	8
P_r , мм вод. ст	530	450	400	350	300	250	200	150
P_b , мм рт.ст.	720	710	720	730	740	750	680	690

Розв'язання

Визначаємо абсолютний тиск

Покази барометра отримано при температурі ртуті $t = 30 \text{ }^\circ\text{C}$.

Ці покази необхідно звести до $0 \text{ }^\circ\text{C}$.

$$P_v = 700 (1 - 0,000172 \cdot 30) = 696,388 \text{ мм рт.ст.}$$

Перераховуємо мм вод.ст. у мм рт.ст.

$$500/13,6 = 36,764 \text{ мм рт.ст.}$$

Абсолютний тиск дорівнює:

$$P = 696,388 - 36,764 = 659,624 \text{ мм рт. ст.} = 87949,96 \text{ Па}$$

Задача 4 Тиск пари в котлі дорівнює $P_n = 0,04$ МПа за за атмосферного тиску $P_{b1} = 725$ мм рт.ст. Скільки дорівнює надлишковий тиск у котлі, якщо покази барометра збільшились до $P_{b2} = 785$ ммрт.ст?

Значення величин для інших варіантів наведено в табл.1.4

Таблиця 1.4

Величини	1	2	3	4	5	6	7	8
P_n , МПа	0,07	0,82	0,9	0,40	0,5	0,6	0,12	0,18
P_{b1} , мм рт.ст.	725	710	700	710	725	700	690	690
P_{b2} , мм рт.ст.	745	760	745	760	760	750	750	760

Розв'язання

$$P_{в1} = 725 \text{ мм рт.ст.} = 96\,660 \text{ Па};$$
$$P_{в2} = 785 \text{ мм рт.ст.} = 104\,660 \text{ Па}.$$

Абсолютний тиск у котлі:

$$P = 40\,000 + 96\,660 = 136\,660 \text{ Па}.$$

Надлишковий тиск за показами барометра:

$$P_{в2} = 104\,660 \text{ Па},$$

$$P_{м2} = 136\,660 - 104\,660 = 32\,000 \text{ Па}.$$

Задача 5 Манометр установлений у відкритій кабіні літака, який знаходиться на землі, і показує тиск масла 0,6 МПа, коли барометричний тиск дорівнює $P_{б1} = 750$ мм рт. ст. визначити покази манометра після піднімання літака на деяку висоту, де значення барометричного тиску дорівнює $P_{б2} = 0,59$ бар, а величина абсолютного тиску є величиною незмінною. Величина прискорення сили ваги ($g = 9,80665 \text{ м/с}^2$) не залежить від висоти знаходження літака.

Значення величин для інших варіантів наведено в табл. 1.5:

Таблиця 1.5

Величини	1	2	3	4	5	6	7	8
$P_{н}$, МПа	0,61	0,60	0,62	0,58	0,55	0,56	0,52	0,57
$P_{б1}$, мм рт.ст.	748	744	740	735	745	750	752	730
$P_{б2}$, бар	0,58	0,57	0,56	0,55	0,53	0,52	0,51	0,49

Розв'язання

Абсолютний тиск масла у випадку, коли літак перебуває на землі,

$$P = P_{б} + P_{н}.$$

Перераховуємо значення $P_{б}$ у МПа.

$$P_{б} = 750/7500 = 0,1 \text{ МПа}.$$

$$P = 0,6 + 0,1 = 0,7 \text{ МПа}.$$

Покази манометра після піднімання літака на деяку висоту, де значення барометричного тиску дорівнює $P_{б2} = 0,59$ бар.

$$P_{н} = P - P_{б} = 0,7 - 0,059 = 0,641 \text{ МПа}.$$

Задача 6. У ліфті, який рухається вниз із прискоренням $a = 2,5 \text{ м/с}^2$, розташований ртутний барометр. Визначити висоту h стовпчика ртуті в барометрі, якщо барометричний тиск повітря дорівнює $P_b = 750 \text{ мм рт.ст.}$

Значення величин для інших варіантів наведено в табл.1.6

Таблиця 1.6

Величини	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$a, \text{ м/с}^2$	2,1	2,40	2,2	2,3	2,55	2,45	2,35	2,25	2,6
$P_b, \text{ мм рт.ст.}$	748	744	740	735	745	750	752	730	734

Розв'язання

Запишемо рівняння:

$$P(g - a) \cdot h \cdot F = h \cdot g \cdot P_b \cdot F \quad \text{тоді,}$$

$$H = P_b \frac{g}{g - a} = 750 \frac{9,81}{9,81 - 2,5} = 1006,49 \text{ мм рт.ст.}$$

Задача 7 Термометр, проградуирований за шкалою Фаренгейта, показує значення: -280°F ; 20°F ; 100°F ; 209°F ; 520°F ; 1205°F ; Зробити перерахунок у $^\circ\text{C}$.

Задача 8 Визначити питомий об'єм і густину газу при нормальних умовах.

Значення величин для інших варіантів наведено в табл.1.7:

Таблиця 1.7

Величини	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Газ	Повітря	CO ₂	O ₂	H ₂	SO ₂	N ₂	NH ₃	H ₂ O	CO

Задачу розв'язуємо для варіанта 1: газ – повітря.

Згідно з висновком закону Авогадро, об'єм одного моля при нормальних умовах дорівнює $22,4 \text{ м}^3$, тобто $\mu\zeta = 22,4 \text{ м}^3/\text{кмоль}$, тоді $\zeta = 22,4/\mu \text{ м}^3/\text{кг}$,

Де μ – молекулярна маса газу, для порівняння дорівнює 29 кг/кмоль .

$$\zeta = 22,4/29 = 0,772 \text{ м}^3/\text{кг}; \quad \rho = 0,1/\zeta = \mu/22,4 = 1/0,772 = 1,295 \text{ кг/м}^3.$$

Задача 9 Розрахувати питомий об'єм і густину газу CO для $P = 0,1 \text{ МПа}$ і $t = 20^\circ\text{C}$.

Значення величин для інших варіантів наведено в табл. 1.8

Величини	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Газ	CO	CO ₂	O ₂	H ₂	SO ₂	N ₂	NH ₃	H ₂ O	Повітря
$t, ^\circ\text{C}$	20	5	10	15	25	30	35	40	36

Розв'язання

Питомий об'єм СО визначаємо з рівняння стану ідеального газу для 1кг:

$$P \cdot \zeta = R \cdot T, \quad R = 8314/\mu = 8314/(28) = 296,928 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К});$$

6

$$\zeta = RT/P = (296,928 \cdot 293)/0,1 \cdot 10 = 0,8699 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$\rho = 1/\zeta = P/RT = 1/0,8699 = 1,1495 \text{ кг}/\text{м}^3.$$

Задача 10. Газгольдер (рис.1.1) має початковий об'єм $V_1 = 15 \text{ м}^3$ і в ньому знаходиться газ під тиском $P_1 = 0,03 \text{ МПа}$ з температурою $t_1 = 10^\circ\text{C}$. У процесі підведення теплоти об'єм газгольдера збільшився до $V_2 = 16,5 \text{ м}^3$, а температура газу не змінилась. Визначити значення кінцевого тиску.

Значення величин для інших варіантів наведено в табл.1.9

Таблиця 1.9

Величини	1	2	3	4	5	6	7	8
$P_1, \text{ МПа}$	0,025	0,028	0,024	0,027	0,028	0,029	0,031	0,032
$V_2, \text{ м}^3$	17,75	17,78	17,80	17,82	17,84	17,86	17,88	17,90

Розв'язання

Величину кінцевого тиску P_2 визначимо з рівняння:

$$P_1 V_1 = P_2 V_2, \quad \text{тоді} \quad P_2 = P_1 \frac{V_1}{V_2} = 0,03 \frac{15}{16,5} = 0,0272 \text{ МПа}.$$

Задача 11. У парозбірнику знаходиться водяна пара в кількості $m = 300 \text{ кг}$. Визначити об'єм пари $\zeta = 20,2 \text{ см}^3/\text{г}$.

Значення величин для інших варіантів наведено в табл.1.10

Таблиця 1.10

Величини	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$m, \text{ кг}$	200	240	260	280	180	160	220	250	140
$\zeta, \text{ см}^3/\text{г}$	15,2	18,4	19,5	19,2	18,2	16,0	22,2	17,8	21,3

Розв'язання

Задачу розв'язуємо для варіанта 1. Об'єм парозбірника дорівнює:

$$V = m \cdot \zeta = 300 \cdot 20,2 \cdot 10^{-3} = 6,06 \text{ м}^3.$$

Задача 12 До газгольдера по трубопроводу діаметром $d = 50\text{мм}$ подається газ з питомим об'ємом $\zeta = 0,5 \text{ м}^3/\text{кг}$. Визначити, за який період часу газ наповнить газгольдер об'ємом $V = 5 \text{ м}^3$. Середня швидкість газу в трубопроводі дорівнює $2,5\text{м/с}$; густина газу після наповнення повинна дорівнювати $1,22\text{кг/ м}^3$.

Значення величин для інших варіантів наведено в табл.1.11

Таблиця 1.11

Величини	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\zeta, \text{ м}^3/\text{кг}$	0,52	0,6	0,54	0,56	0,62	0,64	0,66	0,7	0,45
$W, \text{ м/с}$	2,6	2,7	2,6	2,55	2,53	2,62	2,81	2,4	2,84
$V, \text{ м}^3$	4	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5
$P, \text{ кг/ м}^3$	1,60	1,66	1,70	1,76	1,80	1,82	1,86	1,90	1,94

Розв'язання

Розраховуємо кількість газу, яка подається в газгольдер за 1с (витрату газу):

$m_{\text{г}} \cdot \zeta = F \cdot W$, де F – площа поперечного перетину трубопроводу, дорівнює $0,00196\text{м}^2$.

$$m_{\text{г}} = \frac{F \cdot W}{\zeta} = \frac{0,00196 \cdot 2,5}{0,5} = 0,00981\text{кг/с}$$

Необхідна маса газу в газгольдера газом дорівнює:

$$t = \frac{m}{m_{\text{г}}} = \frac{6,1}{0,00981} = 621,8 \text{ с.}$$

Задача 13 У повітряному балоні після запуску двигуна внутрішнього згорання тиск знизиться від $P_1 = 3$ до $P_2 = 2,4$ МПа. Розрахувати об'єм повітря, випущеного з балона, якщо параметри доквілля такі: $P_б = 100,2$ кПа і $t_1 = 18^\circ\text{C}$. Умістність пускового балона дорівнює $0,2 \text{ м}^3$, температури повітря в балоні до випуску $t_1 = 18^\circ\text{C}$, а після випуску $t_2 = 10^\circ\text{C}$.

Значення величин для інших варіантів наведено в табл.1.12:

Таблиця 1.12

Величини	1	2	3	4	5	6	7	8
$P_1, \text{ МПа}$	3,0	3,1	3,2	3,3	2,9	2,8	2,7	3,0
$P_2, \text{ МПа}$	2,6	2,1	2,0	1,9	1,8	1,7	1,6	2,0
$t_1, ^\circ\text{C}$	21	22	19	18	13	15	14	16

Маса витраченого повітря:

$$m_1 = \frac{P_1 \cdot V}{P \cdot T_1} = \frac{3000 \cdot 0,2}{0,287 \cdot 291} = 7,285 \text{ кг.}$$

$$m_2 = \frac{P_1 \cdot V}{P \cdot T_2} = \frac{2400 \cdot 0,2}{0,287 \cdot 283} = 5,098 \text{ кг.}$$

$$m = m_1 - m_2 = 7,285 - 5,098 = 2,187 \text{ кг.}$$

Об'єм витраченого повітря:

$$V = \frac{m \cdot P \cdot T_1}{P_1} = \frac{2,187 \cdot 287 \cdot 291}{100,2 \cdot 10^3} = 1,83 \text{ кг.}$$

Задачі для самостійного рішення

Задача 14. Тиск 100 мм рт. ст. і 100 мм вод. ст., узяті при 0 °С, виразити в Паскалях.

Задача 15. Визначити абсолютний тиск в котлі і в конденсаторі, якщо тиск в паровому котлі по манометру 5 МПа, розрідження по вакуумметру 0,8 кг.с/см², атмосферний тиск 735 мм. рт. ст.

2 Ідеальні гази і їх закони

Задача 1. Визначити щільність кисню і азоту за нормальних умов (760 мм рт. ст., 0°С).

Рішення. По формулі (13) маємо:

$$\rho_{O_2} = \frac{\mu_{O_2}}{V\mu} = \frac{32}{22,4} = 1,429 \text{ кг/м}^3;$$

$$\rho_{N_2} = \frac{\mu_{N_2}}{V\mu} = \frac{28}{22,4} = 1,251 \text{ кг/м}^3.$$

Задача 2. Визначити щільність кисню при МПа $p = 8$ і

Рішення. По рівнянню (14):

$$\rho_{O_2} = \frac{p}{RT} = \frac{8 \cdot 10^6 \cdot 32}{8314 \cdot 400} = 77 \text{ кг/м}^3$$

Задача 3. Атмосферне повітря містить 20,97% кисню, 0,03 — вуглекислого газу і 79%—азота. За нормальних умов визначити щільність і молекулярну масу, що здається, суміші.

Рішення.

$$\rho_{\text{см}} = (r\rho)_{\text{O}_2} + (r\rho)_{\text{CO}_2} + (r\rho)_{\text{N}_2} = 0,2097 \cdot 1,429 + 0,0003 \cdot 1,964 + 0,79 \cdot 1,251 \approx 1,293 \text{ кг/м}^3;$$

$$\mu_{\text{см}} = (r\mu)_{\text{O}_2} + (r\mu)_{\text{CO}_2} + (r\mu)_{\text{N}_2} = 0,2091 \cdot 32 + 0,0003 \cdot 44 + 0,79 \cdot 28 \approx 28,95.$$

Задачі для самостійного рішення

№1

Після запуску ДВЗ тиск стисненого повітря в пусковому балоні знизився від 3,5 до 2,9 МПа. Визначить об'єм витраченого повітря для температури і тиску навколишнього середовища 18°C і 1008 гПа, якщо вмістимість пускового балона 0,2 м³, температура повітря в балоні до пуску 18°C, а після пуску 10°C.

№2

Для пуску дизелів використовують стиснене повітря. Визначити відношення абсолютних тисків в балоні, якщо до пуску манометр показував $P_{1\text{надл}} = 54 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$, а після пуску $P_{2\text{надл}} = 29,4 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$. Навколишній тиск 742 мм.рт.ст. при температурі 293,15 К.

№3

В балоні ємністю 40 літрів знаходиться кисень при температурі 37°C з тиском 112 ат за манометром. Атмосферний тиск 736 мм.рт.ст. Визначити масу кисню і його густину. Молекулярна маса кисню 32 кг/кмоль.

№4

Роторний компресор всмоктує в 1 хвилину 0,8 м³ повітря з тиском 0,98 бар і температурою 12°C і подає його в резервуар ємністю 15 м³, піднімаючи тиск в ньому до 5 кгс/см² за манометром, причому температура повітря в резервуарі підвищується з 12 до 43°C. Визначити кількість поданого в резервуар повітря, час роботи компресора і його годинну видатність в кубічних метрах при НФУ. До початку роботи резервуар компресора був відкритий.

№5

В резервуарі ємністю 12 м³, що містить повітря для пневматичних робіт, тиск дорівнює 8 ат за манометром, з температурою повітря 22°C. Після використання частини повітря для робіт тиск впав до 4 ат, а температура до 17°C. Визначити кількість використаного повітря, якщо $P_{\text{бар}} = 1 \text{ ат}$.

№6

В балоні ємністю $0,1 \text{ м}^3$ знаходиться кисень з тиском 6 МПа і температурою 25°C . Після того, як з нього випустили частину газу, покази манометра стали 3 МПа , а температура знизилась до 15°C . Визначити масу випущеного кисню, якщо барометричний тиск 1000 гПа . Молекулярна маса кисню 32 кг/кмоль .

№7

В резервуар місткістю $8,5 \text{ м}^3$ компресор подає повітря з температурою 15°C і тиском 988 гПа . За який час компресор, подача якого складає $3 \text{ м}^3/\text{хв}$. наповнить резервуар до тиску $P_{\text{надл}} = 1,8 \text{ МПа}$, якщо температура повітря в резервуарі зі вказаним тиском 47°C . Перед накачуванням резервуар був з'єднаний з атмосферою.

№8

Визначити густину кисню при $P=8 \text{ МПа}$ і $t=127^\circ\text{C}$.

№9

Атмосферне повітря містить $20,97\%$ кисню, $0,03$ – вуглекислого газу і 79% азоту. Визначити густину і молекулярну масу суміші за нормальних умов.

№10

Визначити кількість балонів ємністю 80 л . для перевезення 300 кг . Кислоролу, якщо при температурі 27°C тиск газу в балоні склав 16 МПа . Барометричний тиск 758 мм рт. ст. , газова стала кислю роду $259,8 \text{ Дж/кг К}$.

№11

Визначити масу вуглекислого газу (CO_2), що міститься в балоні на 100 л . при температурі 80°C і абсолютному тиску 8 Бар . Газова стала вуглекислого газу $189,9 \text{ Дж/кг. К}$.

3 Теплоємність газів

Задача 1. Визначити масову теплоємність кисню при $\nu=\text{const}$ і $p=\text{const}$ і умові, що теплоємність не залежить від температури.

Рішення. Використовуємо значення молярної теплоємності (див. табл. 1).

$$c_\nu = \frac{\mu c_\nu}{\mu} = \frac{20,29}{32} = 0,655 \frac{\text{кДж}}{(\text{кг} \cdot \text{К})};$$

$$c_p = \frac{\mu c_p}{\mu} = \frac{29,2}{32} = 0,91 \frac{\text{кДж}}{(\text{кг} \cdot \text{К})}.$$

Задача 2. Визначити середню об'ємну теплоємність азоту c'_{pm} в інтервалі від $t_1=100^\circ\text{C}$ до $t_2=1000^\circ\text{C}$. Залежність теплоємності від температури нелінійна.

Рішення. З [8] знаходимо значення об'ємних теплоємностей:

$$c'_{pm} \Big|_0^{100} = 1,300 \frac{\text{кДж}}{(\text{м}^3 \cdot \text{К})}; \quad c'_{pm} \Big|_0^{1000} = 1,397 \frac{\text{кДж}}{(\text{м}^3 \cdot \text{К})}.$$

По формулі (23):

$$c'_{pm} \Big|_{100}^{1000} = \frac{c'_{pm} \Big|_0^{1000} t_2 - c'_{pm} \Big|_0^{100} t_1}{t_2 - t_1} = \frac{1,397 \cdot 1000 - 1,300 \cdot 100}{900} = 1,405 \frac{\text{кДж}}{(\text{м}^3 \cdot \text{К})}.$$

Задачі для самостійного рішення

№1

Скільки необхідно витратити теплоти для нагріву 18 Дм^3 води при сталому тиску від 21 до 120°C .

№2

Визначити кіломольну теплоємність газу при $v=\text{const}$, якщо відомо, що його об'ємна теплоємність $C'_v = 1,31 \text{ кДж/м}^3 \text{ К}$.

№3

Визначити кількість тепла, яке треба підвести при сталому тиску до 20 м^3 багатоатомного газу, взятого при нормальних умовах. Газ нагрівається від температури $t_1=16^\circ\text{C}$ до $t_2=126^\circ\text{C}$ при сталій теплоємності.

№4

Визначити середню об'ємну теплоємність азоту C'_{pm} в інтервалі від $t_1=100^\circ\text{C}$ до $t_2=1000^\circ\text{C}$. Залежність теплоємності від температури нелінійна.

4. Перший закон термодинаміки

Задача 1. Знайти числове значення теплового еквівалента $1 \text{ кВт} \cdot \text{год}$ в ккал.

Рішення.

$$1 \text{ кВт} \cdot \text{год} = 3600 \text{ кДж} = \frac{3600}{4,1868} = 860 \text{ ккал.}$$

Задача 2. Питома витрата теплоти рівна $2700 \text{ ккал/кВт} \cdot \text{ч}$. Визначити відповідну витрату в одиницях СІ.

Рішення. $2700 \cdot 4,1868 = 11307,6$ кДж/кВт-ч.

Задача 3. До повітря в кількості 2 кг, ув'язненому в циліндр з рухомих поршнем, підводиться ззовні 1000 кДж теплоти. Величина проведеної при цьому роботи складає 1100 кДж. Визначити зміну внутрішньої енергії повітря.

Рішення. $Q = \Delta U + L$ кДж;

$$\Delta U = Q - L = 1000 - 1100 = -100 \text{ кДж.}$$

$$100 \text{ Для } 1 \text{ кг: } \Delta u = \frac{\Delta U}{G} = -\frac{100}{2} = -50 \text{ кДж/кг.}$$

Знак «мінус» указує, що внутрішня енергія в процесі зменшується, тобто, не дивлячись на підведення теплоти, температура повітря знижується.

Задачі для самостійного рішення

№1

До 1 м^3 водяної пари підводиться $0,15$ кВт-год теплоти, внаслідок чого його внутрішня енергія зростає на 170 кДж. Визначити теплоємність, роботу зміни тиску і об'єму, зміну ентальпії та ентропії, якщо $P_1 = 0,5 \text{ МПа}$, $\rho_1 = 3,8 \text{ кг/м}^3$.

№2

Густина 1 м^3 водяної пари зростає втричі, а температура зменшується в $1,85$ разів. Визначити теплоту, роботу зміни тиску, зміну внутрішньої енергії та ентропії, якщо $P_1 = 0,35 \text{ МПа}$, $t_1 = 500 \text{ К}$.

№3

1 м^3 азоту з параметрами $P_1 = 1,25 \text{ МПа}$ і $\rho_1 = 4,5 \text{ кг/м}^3$ виконує 120 кДж роботи зміни об'єму, внаслідок чого його ентальпія зменшується на 60 кДж. Визначити теплоємність, і теплоту процесу, зміну внутрішньої енергії та ентропії, якщо.

№4

Густина 1 м^3 азоту зростає втричі, а температура зменшується вдвічі. Визначити роботу зміни тиску, теплоту, зміну внутрішньої енергії та ентропії, якщо $P_1 = 0,45 \text{ МПа}$, $T_1 = 550 \text{ К}$.

№5

Внутрішня енергія $1,12 \text{ м}^3$ окису вуглецю зростає на 350 кДж завдяки здійсненню роботи зміни тиску в 30 кДж. Визначити теплоємність процесу, роботу зміни об'єму, теплоту, зміну ентальпії та ентропії, якщо $P_1 = 0,1 \text{ МПа}$, $t_1 = 27^\circ \text{C}$.

№6

Внутрішня енергія 1 м^3 повітря зростає на 360 кДж завдяки здійсненню роботи зміни об'єму в 25 кДж. Визначити роботу зміни тиску, теплоту, зміну ентальпії та ентропії, якщо $P_1 = 0,12 \text{ МПа}$, $T_1 = 305 \text{ К}$.

№7

В процесі стиску 1 м^3 азоту до п'ятикратного зменшення об'єму його ентальпія зростає на 150 кДж . Визначити теплоємність, теплоту, роботу зміни об'єму, зміну внутрішньої енергії та ентропії, якщо $P_1=0,11\text{ МПа}$, $t_1=17^\circ\text{С}$.

№8

Питомий об'єм окису сірки зменшується в 4 рази, а температура – в 2 рази. Визначити теплоту, роботу зміни тиску, зміну внутрішньої енергії та ентропії, якщо $P_1=0,4\text{ МПа}$, $T_1=700\text{ К}$.

№9

До повітря в кількості 5 кг , що знаходиться в циліндрі з рухомим поршнем, підводиться з зовні 1000 кДж теплоти. Величина приведеної при цьому роботи складає 1100 кДж . Визначити зміну внутрішньої енергії повітря.

№10

Обчислити роботу, здійснювану газом, який знаходиться в циліндрі рід рухомим поршнем, якщо відомо, що до газу підведено 500 кДж тепла і $0,6$ загальної кількості тепла пішло на зміну внутрішньої енергії (нагрів газу).

5 Термодинамічні процеси

Задача 1. У закритій судині місткістю 4 м^3 знаходиться повітря при $p_1=0,1\text{ МПа}$ і $t_1=27^\circ\text{С}$. В результаті підведення теплоти температура газу підвищилася до $t_2=500^\circ\text{С}$. Визначити кінцеві тиск p_2 , кількість підведеної теплоти Q , зміну ентальпії ΔH ; теплоємність повітря вважати нелінійною, залежною від температури.

Рішення. З рівняння стану знаходимо

$$G = \frac{p_1 v_1}{RT_1} = \frac{0,1 \cdot 10^6 \cdot 4}{287 \cdot 300} = 4,66\text{ кг.}$$

Кінцевий тиск

$$p_2 = p_1 \cdot \frac{T_2}{T_1} = 0,1 \cdot \frac{773}{300} = 0,258\text{ МПа.}$$

($T \approx t + 273\text{ К}$).

Середня теплоємність повітря

$$c_{vm} = \frac{c_{vm}|_0^{t_2} - c_{vm}|_0^{t_1} \cdot t_1}{t_2 - t_1} = \frac{0,7519 \cdot 500 - 0,7172 \cdot 27}{500 - 27} = 0,755\text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}.$$

Середня ізобарна теплоємність

$$c_{pm} = c_{vm} + R = 0,755 + 0,287 = 1,042\text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}.$$

Кількість підведеної теплоти

$$Q = G \cdot c_{vm}(t_2 - t_1) = 4,66 \cdot 0,755(500 - 27) = 1662 \text{ кДж.}$$

Зміна ентальпії

$$\Delta H = \Delta h \cdot G = G \cdot c_{vm}(t_2 - t_1) = 4,66 \cdot 1,042(500 - 27) = 2290 \text{ кДж.}$$

Задача 2. Кисень в кількості 1 кг адіабатно розширюється від початкового стану, визначуваного тиску $p_1 = 1,0 \text{ МПа}$ і температурою $t_1 = 227^\circ \text{C}$, до кінцевого стану з тиском $p_2 = 0,1 \text{ МПа}$. Визначити кінцеві параметри газу (v_2, t_2) і роботу розширення

Рішення. З рівняння Клапейрона знаходимо питомий об'єм

$$v_1 = \frac{RT_1}{p_1} = \frac{260 \cdot 550}{1 \cdot 10^6} = 0,143 \text{ м}^3 / \text{кг.}$$

Кінцевий об'єм (v_2) знаходимо із співвідношення параметрів в адіабатному процесі (для двоатомних газів $k = \frac{c_p}{c_v} = 1,4$):

$$v_2 = v_1 \left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{1}{k}} = 0,143 \cdot 10^{\frac{1}{1,4}} = 0,74 \text{ м}^3 / \text{кг.}$$

Робота, що здійснюється газом в адіабатному процесі, визначається по рівнянню

$$t = \frac{1}{k-1}(p_1 v_1 - p_2 v_2) = \frac{10^6}{1,4-1}(1,0 - 0,143 - 0,1 \cdot 0,74) = 173 \text{ кДж.}$$

Кінцева температура газу

$$T_2 = \frac{p_2 v_2}{R} = \frac{0,1 \cdot 10^6 \cdot 0,74}{260} = 285 \text{ К.}$$

$$t_2 = T_2 - 273 \text{ К} = 285 - 273 = 12^\circ \text{C.}$$

Задачі для самостійного рішення

№1

У закритій судині місткістю 4 м^3 знаходиться повітря при $p_1 = 0,1 \text{ МПа}$ і температурі $t_1 = 27^\circ \text{C}$. В результаті підведення теплоти температура газу підвищилася до $t_2 = 500^\circ \text{C}$. Визначити кінцевий тиск P_2 , кількість підведеної теплоти Q , зміну ентальпії ΔH ; теплоємність повітря вважати нелінійною, залежною від температури.

№2

Кисень в кількості 1 кг адіабатно розширюється від початкового стану з тиском $p_1=1,0$ МПа і температурою $t_1=227$ °С, до кінцевого стану з тиском $p_2=0,1$ МПа. Визначити кінцеві параметри газу (v_2, t_2) і роботу розширення.

№3

Визначити кількість тепла, яку треба підвести до 1 кг повітря, що знаходиться в балоні при температурі 10 °С і тиску 30 Бар, щоб збільшити його тиск у півтора рази.

№4

Повітря, маса якого дорівнює 1 кг, ізотермічно розширюється, при цьому його об'єм збільшується у два рази. Визначити роботу і кількість підведеного тепла, якщо температура повітря 50 °С, $\mu=29$ кг/кмоль.

№5

Повітря при $P_1=10$ Бар адіабатно розширюється до тиску $P_2=1,5$ Бар. У скільки разів збільшився його об'єм.

6. Процеси пароутворення

Задача 1. У резервуарі при $p_1=1,4$ МПа знаходиться суміш, що складається з 0,3 кг води і 0,7 кг сухої пари. Визначити ступінь сухості, ентальпію і внутрішню енергію вологої пари.

Рішення. У додатку 6 при $p_1=1,4$ МПа знаходимо питомий об'єм киплячої рідини v' , сухої пари v'' , ентальпію рідини h' , теплоту паротворення r , питому ентропію киплячої води s' і ентропію s'' сухої пари.

$$v' = 0,0011489 \text{ м}^3 / \text{кг};$$

$$h' = 830,1 \text{ кДж/кг};$$

$$r = 1958,3 \text{ кДж/кг};$$

$$s'' = 6,4665 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}.$$

$$v'' = 0,14072 \text{ м}^3 / \text{кг};$$

$$h'' = 2788,4 \text{ кДж/кг};$$

$$s' = 2,2836 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}.$$

Визначаємо ступінь сухості:

$$x = \frac{0,7}{0,3 + 0,7} = 0,7.$$

Знаходимо параметри вологої пари:

$$\begin{aligned}
h_x &= h' + rx = 830,1 + 1958,3 \cdot 0,7 = 2200,91 \text{ кДж/кг}; \\
s_x &= s''x + (1-x)s' = 6,4665 \cdot 0,7 + 0,3 \cdot 2,2836 = 5,2116 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}; \\
u_x &= h_x - p v_x = 2200,91 - 1,4 \cdot 10^3 \cdot 0,099204 = 2062,31 \text{ кДж/кг}; \\
v_x &= v''x + (1-x)v' = 0,14072 \cdot 0,7 + (1-0,7) \cdot 0,0011489 \approx 0,099 \text{ м}^3/\text{кг}
\end{aligned}$$

Задача 2. Паротурбінная установка працює по циклу Ренкіна. При вході пари в турбіну $p_1=6$ МПа і $t_1=500^\circ\text{C}$. Тиск в конденсаторі $p_2=0,005$ МПа. Визначити термічний ККД.

Рішення. По h_s – діаграмі знаходимо: $h' = 3422$ кДж/кг; $h_2=2080$ кДж/кг; $p_2=0,005$ МПа відповідає $t_n = 32,9^\circ\text{C}$.

$$\begin{aligned}
h_{2'} &= 4,186 \cdot a_n = 4,186 \cdot 32,9 = 137,8 \text{ кДж/кг}; \\
\eta_t &= \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{2'}} = \frac{3422 - 2080}{3422 - 137,8} = \frac{1342}{3284,2} = 0,40.
\end{aligned}$$

Задача 3. На горизонтальній трубці діаметром $d_{\text{зн}}/d_{\text{вн}} = 38/30$ і довжиною $l = 2$ м відбувається конденсація сухої насиченої пари з тиском $P_n=2,5$ бар. Визначити коефіцієнт тепловіддачі при конденсації, якщо лінійний тепловий потік $q_\ell=165900$ Вт/м, теплопровідність труби $\lambda=50$ Вт(м·К), а коефіцієнт тепловіддачі до внутрішньої стінки труби складає $\alpha_1=6600$ Вт/(м²·К). Середня температура рідини в трубці $\bar{t}_p = 73^\circ\text{C}$.

Рішення

1 Температура зовнішньої поверхні стінки:

$$\begin{aligned}
q_\ell &= \alpha_1(t_{c1} - \bar{t}_p) \\
q_\ell &= \frac{(t_{c2} - t_{n1})\pi}{\frac{1}{2\lambda} \ln \frac{d_2}{d_1}} \text{ звідси } t_{c2} = \frac{q}{2\lambda \cdot \pi} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{q_\ell}{\alpha_1} + \bar{t}_p
\end{aligned}$$

2 Температуру насичення і фізичні параметри пари знайдемо за тиском насичення.

3 Коефіцієнт тепловіддачі при конденсації:

$$\bar{\alpha}_N = 0,7284 \sqrt{\frac{\lambda_p^3 \cdot \rho_p^2 \cdot g \cdot r}{\mu_p \cdot (t_N - t_{c2}) \cdot d}}$$

Задачі для самостійного рішення

№1

За допомогою h_s -діаграми водяної пари визначити ентальпію сухої насиченої пари при тиску 100 Бар.

№2

Перегріта пара з тиском 100 Бар і температурою 500 °С адіабатно розширюється до тиску 0,05 Бар. За допомогою HS-діаграми водяної пари визначити наявний теплоперепад, зміну ентальпій.

№3

За допомогою HS-діаграми водяної пари визначити стан і параметри водяного пару при тиску 1,6 МПа і температурі 550 °С.

№4

Перегрітий пар $p_1=3,0$ МПа і $t_1=350$ °С адіабатно розширюється до $p_2=0,2$ МПа. Користуючись HS-діаграми водяної пари знайти v_1, v_2, H_1, H_2, t_2 .

7 Вологе повітря

Задача 1. У зерносушарку поступає повітря з відносною вологістю $\varphi = 50\%$, підігріте в топковій камері від $T_1 = 283$ К до $T_2 = 363$ К. При виході з сушарки температура повітря 310 К. Потрібно визначити, користуючись діаграмою (мал. 27,6), вологовміст повітря до і після сушки, витрату повітря і теплоти на випаровування 1 кг вологи.

Рішення. На Hd – діаграмі на перетині ізотерми $T_1 = 283$ К і $\varphi = 50\%$ знаходимо точку 1, яка визначає параметри повітря до підігріву. Для цієї точки $d_1 = 4$ г/кг с. п.; $H_1 = 20$ кДж/кг с. п.; з точки 1 проводимо лінію $d = \text{const}$ до перетину з ізотермою $T_2 = 363$ К. Для точки 2 (оскільки нагрів здійснюється при $d = \text{const}$) знаходимо значення ентальпії $H_2 = 100$ кДж/кг с. п. З точки 2 по лінії постійної ентальпії $H_2 = \text{const}$ переміщаємося в точку 3 на лінії ізотерми $T_3 = 363$ К. Для точки 3 знаходимо $d_3 = 25$ г/кг с. п.

Отже, 1 кг сухого повітря (стани точки 2) віднімає в процесі сушки $(d_3 - d_2)$ вологу, тобто $25 - 4 = 21$ г/кг с. п., для випаровування 1 кг вологи буде потрібно $1000/21=47,7$ кг сухого повітря. Витрати теплоти на випаровування 1 кг вологи можна підрахувати так:

$$Q = m_b (H_2 - H_1) = 47,7 \cdot (100 - 20) = 3810 \text{ кДж/кг.}$$

Задачі для самостійного рішення

№1

За допомогою Hd-діаграми вологого повітря визначити вологовміст, ентальпію і парціальний тиск повітря, якщо його температура 76 °С і відносна вологість повітря 72%.

№2

Визначити параметри стану вологого повітря, якщо барометричний тиск 735 мм. рт. ст. температура сухого термометра 23,8 °С, мокрого термометра 19,6 °С.

8 Двигуни внутрішнього згорання, ГТУ і компресори

Задача 1. Визначити основні параметри робочого тіла в характерних точках ідеального циклу ДВЗ з підведенням теплоти при $\nu = \text{const}$ термічний ККД циклу по даним: $p_1 = 0,1$ МПа; $t_1 = 27$ °С; ступінь стиснення $\varepsilon = 4$; ступінь підвищення тиску $\lambda = 1,5$. Робоче тіло — повітря, теплоємність постійна, маса газу 1 кг.

Рішення. Початковий об'єм

$$\nu_1 = \frac{RT_1}{p_1} = \frac{8314 \cdot 300}{28,95 \cdot 0,1 \cdot 10^6} = 0,86 \text{ м}^3 / \text{кг}.$$

Кінцевий об'єм

$$\nu_2 = \frac{\nu_1}{\varepsilon} = \frac{0,86}{4} = 0,215 \text{ м}^3 / \text{кг}.$$

Тиск в точці 2:

$$p_2 = p_1 \left(\frac{\nu_1}{\nu_2} \right)^k = 0,1 \cdot 4^{1,4} = 0,698 \text{ МПа}.$$

Температура в точці 2:

$$T_2 = \frac{p_2 \nu_2}{R} = \frac{0,698 \cdot 10^6 \cdot 0,215}{287} = 524 \text{ К}.$$

Тиск в точці 3:

$$p_3 = \lambda p_2 = 1,5 \cdot 0,698 = 1,047 \text{ МПа}.$$

Температура в точці 3:

$$T_3 = \lambda T_2 = 1,5 \cdot 524 = 786 \text{ К}.$$

Тиск в точці 4:

$$p_4 = \frac{p_3}{\left(\frac{\nu_4}{\nu_3} \right)^k} = \frac{p_3}{\varepsilon^k} = \frac{1,047}{4^{1,4}} = 0,15 \text{ МПа}.$$

Температура в точці 4:

$$T_4 = T_1 \frac{p_4}{p_1} = 300 \frac{0,15}{0,1} = 450 \text{ К}.$$

Масова теплоємність повітря:

$$c_v = \frac{\mu c_v}{\mu} = \frac{20,95}{28,95} = 0,723 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

Кількість підведеної теплоти:

$$q_1 = c_v (T_3 - T_2) = 0,723 \cdot (786 - 524) = 189,5 \text{ кДж}/\text{кг}.$$

Кількість відведеної теплоти:

$$q_2 = c_v (T_1 - T_4) = 0,723 \cdot (300 - 450) = -108 \text{ кДж}/\text{кг}.$$

Термічний ККД циклу:

$$\eta_t = 1 - \frac{q_2}{q_1} = 1 - \frac{108}{189,5} = 0,43.$$

Задачі для самостійного рішення

№1

Визначити ефективну потужність і питому ефективну витрату палива восьмициліндрового чотиритактного дизельного двигуна, якщо середньоіндикаторний тиск $P_i = 7,5$ бар, міра стиску $\varepsilon = 16,5$, кутова швидкість $\omega = 220$ рад/с, механічний ККД $\eta_m = 0,8$, об'єм камери згоряння $V_c = 12 \cdot 10^{-5}$ м³ витрата палива $B = 0,01$ кг/с.

№2

Визначити ефективний ККД шестициліндрового чотиритактного карбюраторного двигуна, якщо середньоєфективний тиск $P = 0,62$ МПа, теплота згоряння палива $Q_H^c = 44$ МДж/кг, діаметр циліндра $D = 0,092$ м, хід поршня $s = 0,082$ м, швидкість поршня $C_{II} = 8,2$ м/с, витрата палива $B = 0,0044$ кг/с.

№3

Для циклу ДВЗ з підведенням теплоти по ізохорі визначити термічний ККД, теоретичну потужність і середній теоретичний тиск P_t за даними: робоче тіло - повітря, $P_1 = 0,1$ МПа, $t_1 = 27^\circ\text{C}$, міра стиску $\varepsilon = 5,5$, витрата палива $B = 0,024$ кг на 1 кг робочого тіла, діаметр циліндра $D = 220$ мм, хід поршня $s = 320$ мм, частота обертання валу $n = 350$ об/хв, двигун чотиритактний, теплота згоряння палива $Q_H^c = 27$ МДж/кг.

№4

Визначити літрову потужність і питому індикаторну витрату палива восьмициліндрового чотиритактного двигуна, якщо середньоіндикаторний тиск $P = 8$ бар, діаметр циліндра $D = 0,12$ м, хід поршня $s = 0,1$ м, швидкість обертання колінчастого валу кутова: $\omega = 377$ рад/с, $\eta_m = 0,8$, загальна витрата палива $B = 16 \cdot 10^{-3}$ кг/с.

№5

Визначити ефективну потужність і витрату палива для шестициліндрового чотиритактного дизельного двигуна, якщо середній індикаторний тиск $P_i = 1$ МПа, повний об'єм циліндра $V = 8 \cdot 10^{-4}$ м³; об'єм камери згоряння $V_c = 7 \cdot 10^{-5}$ м³; $n_b = 2200$ об/хв.; теплота згоряння палива $Q_H^c = 42,8$ МДж/кг; механічний та індикаторний ККД відповідно 0,82 і 0,4.

№6

Визначити індикаторний і механічний ККД чотирициліндрового чотиритактного дизельного двигуна, якщо $P_i = 0,6$ МПа, $\omega = 157$ рад/с; $\varepsilon = 15$; $Q_H^c = 42$ МДж/кг; об'єм камери згоряння $V_c = 2,5 \cdot 10^{-4}$ м³; витрата палива $B = 6 \cdot 10^{-3}$ кг/с; ефективний ККД $\eta_e = 0,4$.

№7

Визначити економію палива, яку дає заміна карбюраторного двигуна на дизельний для $N_i=200$ кВт, якщо індикаторний ККД карбюраторного двигуна 0,36; а дизельного 0,44. Теплота згоряння бензину $Q_{н}^c = 43,5$ МДж/кг, а дизпалива $Q_{н}^c = 42$ МДж/кг.

№8

Розрахувати цикл ДВЗ 1-2-3-4 з підводом теплоти для $v=const$ за даними: $P_1=0,1$ МПа; $t_1 = 27^\circ\text{C}$; ступінь стиску $\varepsilon=4$; міра підвищення тиску $\lambda=1,5$. Робоче тіло має властивості повітря, теплоємність постійна, кількість газу 1 кг.

№9

Визначити теплоту, підведену з паливом у чотирициліндровий чотиритактний дизельний двигун, якщо середньоефективний тиск $P_e=7,25$ бар; питома ефективна витрата палива $b_e=0,25$ кг/(кВт·год); теплота згоряння палива $Q_{н}^c=42$ МДж/кг; швидкість поршня $C_{п}=8$ м/с; діаметр і хід поршня по 0,12 м.

№10

Восьмициліндровий чотиритактний дизельний двигун, ефективна потужність якого 175 кВт, працює на паливі з теплотою згоряння $Q_c^p=42,6$ МДж/кг, а ефективний ККД двигуна $\eta_e=0,373$. Визначити окремі складові теплового балансу двигуна, якщо відомо: витрата охолодної води $G_B=2$ кг/с, а підвищення її температури $\Delta t_B=10$ °С; об'єм відпрацьованих газів $V_{вг}=16,5$ м³/кг; об'єм повітря, необхідний для спалювання 1 кг палива $V_{п}=15,5$ м³/кг; $C'_r=1,45$ кДж(м³·К), температура відпрацьованих газів $t_r=550^\circ\text{C}$, а температура повітря $t_{п}=21^\circ\text{C}$, $C'_п=1,31$ кДж(м³·К).

№11

Визначити складові теплового балансу чотирициліндрового чотиритактного дизельного двигуна, якщо середній ефективний тиск $P_e=6,5$ бар, міра стиску $\varepsilon=7$, об'єм камери згоряння $V_c=10^{-4}$ м³, частота обертання валу $n=4000$ об/хв., питома ефективна витрата палива $b_e=0,34$ кг/(кВт·год); втрати теплоти на охолодження $Q_{ох}=46$ кДж/с; втрати теплоти з відпрацьованими газами $Q_{вг}=56$ кДж/с; втрати від неповного згоряння палива $Q_{нз}=39,6$ кДж/с; невраховані втрати $Q_{зал}=19,8$ кДж/с; теплота згоряння палива $Q_{н}^c=43$ МДж/кг.

№12

Скласти тепловий баланс чотирициліндрового чотиритактного карбюраторного двигуна, якщо середній індикаторний тиск $P_i=7,678$ бар; $\eta_m=0,84$; $\varepsilon=7$; $V_c=1 \cdot 10^{-4}$ м³; $s=0,092$ м, $\omega=418,6$ рад/с; $b_e=0,34$ кг/(кВт·год); Склад палива: $C=86\%$; $H=11\%$; $O_2=3\%$; $CO=2\%$; $\alpha=1,1$; $t_{вг}=500^\circ\text{C}$; $t_{пов}=20^\circ\text{C}$; $G_{ов}=0,8$ кг/с; $\Delta t_{ов}=10^\circ\text{C}$;

№13

Скласти тепловий баланс чотирициліндрового чотиритактного дизельного двигуна, якщо середній індикаторний тиск $P_i=8,84$ бар; $\eta_m=0,82$; $D=s=0,12$ м; $C_{II}=8$ м/с; $Q_H^c = 42,3$ МДж/кг; $b_e=0,252$ кг/(кВт·год); $V_{вг}=16$ м³/кг; $V_{II}=15$ м³/кг; $t_{вг}=540^\circ\text{C}$; $t_{пов}=20^\circ\text{C}$; $G_{ов}=1$ кг/с; $\Delta t_{ов}=10^\circ\text{C}$; $C=85\%$; $\text{CO}_2=10,5\%$; $\text{CO}=2\%$;

№14

Чотирициліндровий чотиритактний карбюраторний двигун з ефективною потужністю 50 кВт працює на паливі з теплою згоряння $Q_H^c = 43$ МДж/кг при $\eta_e=0,25$. Визначити питому витрату палива і витрату води в системі охолодження, якщо втрати теплоти в системі складають 20% від теплоти, підведеної з паливом, а підігрів води складає 10°C .

№15

Визначити втрату теплоти від неповного згоряння палива у восьмициліндровому чотиритактному дизельному двигуні, якщо $P_e=7,5$ бар, повний об'єм циліндра $V=8 \cdot 10^{-5}$ м³/кг; частота обертання валу 314 рад/с; теплота згоряння палива $Q_H^c = 43$ МДж/кг; питома ефективна витрата палива $b_e=0,25$ кг/(кВт·год), а частка втрат від неповного згоряння складає 4%.

№16

Чотирициліндровий чотиритактний дизельний двигун з літровою потужністю $N_{л}=10\,000$ кВт/м³ працює на паливі з теплою згоряння $Q_H^c = 42$ МДж/кг; при $\eta_e=0,35$. Механічний ККД ДВЗ $\eta_m=0,84$. Визначити втрати теплоти в системі охолодження, якщо діаметр циліндра $D=0,12$ м, а хід поршня $s=0,14$ м; витрати води в системі $G_{ов}=1$ кг/с, а підвищення її температури 10°C . Визначити також кількість теплоти, яка поступає з паливом.

№ 17

Визначити витрату води в системі охолодження для восьмициліндровий чотиритактного дизельного двигуна, якщо втрати теплоти на охолодження $Q_{ох}=85$ кДж/с; підігрів води 10°C ; літраж ДВЗ 10^{-4} м³; швидкість поршня 9 м/с; хід поршня 0,2 м; коефіцієнт наповнення циліндрів $\eta_v=0,8$. Визначити також витрату повітря, якщо густина повітря $\rho=1,22$ кг/м³.

№18

Поршневий односхідчастий компресор стискає повітря від $P_1 = 1$ бар до $P_2 = 0,5$ МПа. Визначити дійсну видатність компресора, ефективну потужність привода і середній індикаторний тиск, якщо діаметр циліндра $D = 0,2$ м; хід поршня $s = 0,15$ м; частота обертання $\omega = 94,2$ рад/с; відносний об'єм шкідливого простору $\sigma = 0,045$; показник політропи газу, що залишається в шкідливому просторі $n = 1,1$; коефіцієнт що враховує зменшення тиску при

всмоктуванні $\eta_v = 0,95$. Відносний внутрішній ККД $\eta_{oi} = 0,85$; механічний ККД $\eta_m = 0,9$, а початкова температура $t_1 = 27^\circ\text{C}$.

№19

Компресор з охолодником стискає повітря від $P_1 = 0,1$ МПа до $P_2 = 1$ МПа. Початкова температура $t_1 = 27^\circ\text{C}$, а дійсна температура після стиску $t_2 = 180^\circ\text{C}$. Визначити ефективну потужність приводу компресора і кількість відведеної теплоти, якщо видатність його 600 м³/год, ефективний ізотермічний ККД $0,8$; механічний ККД $0,85$, а теплоємність повітря $C_p = 1$ кДж/(кг·К).

№20

Двосхідчастий компресор стискає азот від $P_1 = 1,2$ бар до $P_2 = 30$ бар. Показник політропи в обох східцях $n = 1,3$. В охолоднику газ охолоджується до початкової температури $t_1 = 17^\circ\text{C}$ водою, витрата якої $G = 2$ кг/с. Підігрів води складає 10°C . Визначити потужність компресора і економію електроенергії в порівнянні з роботою односхідчастого компресора, якщо теплоємність азоту $C_p = 1$ кДж/(кг·К); $\eta_{oi} = 0,85$; $\eta_m = 0,95$; $\eta_o = 0,9$.

№21

Односхідчастий поршневий компресор має характеристики: $D = 0,3$ м; $s = 0,45$ м; $n_B = 980$ об/хв; $\lambda = 3,2$; $\sigma = 0,03$. Визначити об'ємну видатність компресора для випадків: 1) адіабатного стиску; 2) політропного з показником політропи $1,18$; 3) ізотермічного стиску повітря, яке залишається в шкідливому просторі.

№22

Компресор втягує повітря з тиском 1 бар і температурою 20°C і стискає його до 6 бар. Визначити теоретичну потужність компресора для ізотермічного, адіабатного і політропного ($n = 1,2$) стисненні; знайти також параметри стисненого повітря. Годинна видатність компресора 1200 м³/год для НФУ.

№23

Компресор з годинною видатністю 1500 м³/год при НФУ втягує повітря з тиском $0,95$ бар і температурою 15°C ; ступінь стиску $\lambda = 10$. Визначити для ізотермічного, адіабатного і політропного ($n = 1,25$) процесів компресора, якщо: $\eta_{iz} = 0,5$; $\eta_{п} = 0,8$; $\eta_{ад} = 0,9$; $C_{v\text{ пов}} = 0,716$ кДж/(кг·К):

- 1) температуру стисненого повітря;
- 2) годинний об'єм стисненого повітря;
- 3) питому роботу стиску;
- 4) потужність компресора;
- 5) потужність електродвигуна для компресора з ККД приводу 85% ;
- 6) кількість відроджуваної теплоти. Вода нагрівається до $\Delta t = 12^\circ\text{C}$.

№24

Витрата односхідчастого поршневого компресора складає $720 \text{ м}^3/\text{год}$ для $t = 17^\circ\text{C}$ і $\rho = 1.1 \text{ кг}/\text{м}^3$. Міра підвищення тиску 5, показник адіабати 1,4. Визначити економію потужності із застосуванням ізотермічного стиску, якщо внутрішній та механічний ККД компресора по 0,85.

№25

В односхідчастому компресорі міра підвищення тиску 7, а показник адіабати 1,4. Ефективна потужність приводу 5 кВт. Визначити швидкість поршня, якщо $D=s=0,2\text{м}$, механічний і внутрішній ККД по 0,85, а початкові параметри $P_1=1 \text{ бар}$, $\rho=1,15 \text{ кг}/\text{м}^3$, $\eta_v = 0,95$; $\sigma=0,05$.

№26

Визначити теоретичну роботу на привід односхідчастого і трисхідчастого компресорів для стиску повітря до тиску 12,5 МПа. Початковий тиск 0,1 МПа і температура $t_1 = 300^\circ\text{C}$. Показник політропи для всіх східців $n=1,2$. Визначити роботу на 1м^3 повітря і температуру в кінці стиску в односхідчастому і трисхідчастому компресорах.

№27

Визначити основні параметри робочого тіла в характерних точках ідеального циклу ДВЗ з підведенням теплоти $v=\text{const}$, термічний ККД циклу по даних: $P_1=0,1\text{МПа}$; $t_1=27^\circ\text{C}$; ступінь стиснення $\varepsilon=4$; ступінь підвищення тиску $\lambda=1,5$. Робоче тіло – повітря, теплоємність постійна, маса газу 1 кг.

№28

Компресор втягує повітря з тиском 1 бар і температурою 20°C і стискає його до 6 бар. Визначити теоретичну потужність компресора для ізотермічного, адіабатного і політропного ($n=1,2$) стиснення; знайти також параметри стисненого повітря. Годинна видатність компресора $1200 \text{ м}^3/\text{год}$ для НФУ.

№29

Витрата односхідчастого поршневого компресора складає $720 \text{ м}^3/\text{год}$ для $t = 17^\circ\text{C}$ і $\rho = 1.1 \text{ кг}/\text{м}^3$. Міра підвищення тиску 5, показник адіабати 1,4. Визначити економію потужності із застосуванням ізотермічного стиску, якщо внутрішній та механічний ККД компресора по 0,85.

№30

Для циклу ДВЗ з підведенням теплоти по ізохорі визначити термічний ККД, теоретичну потужність і середній теоретичний тиск P_t за даними: робоче тіло - повітря, $P_1 = 0,1 \text{ МПа}$, $t_1 = 27^\circ\text{C}$, міра стиску $\varepsilon = 5,5$, витрата палива $B = 0,024 \text{ кг}$ на 1 кг робочого тіла, діаметр циліндра $D = 220 \text{ мм}$, хід поршня $s = 320 \text{ мм}$, частота обертання валу $n = 350 \text{ об}/\text{хв}$, двигун чотиритактний, теплота згоряння палива $Q_H^c = 27 \text{ МДж}/\text{кг}$.

9. Теплопровідність

Задача 1. Визначити тепловий потік через бетонну стіну будівлі товщиною 400 мм, заввишки 4000 мм, завдовжки 5000 мм, якщо температура на її внутрішній поверхні $t_{c1} = 20^{\circ}\text{C}$, а на зовнішній — $t_{c2} = 0^{\circ}\text{C}$. Коефіцієнт теплопровідності бетону $1,0 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$

Рішення.

$$Q = \frac{(t_{c1} - t_{c2})}{\delta/\lambda} = \frac{20 \cdot 4 \cdot 2}{0,4/1} = 1000 \text{ Вт.}$$

Задача 2. Паропідігрівник виконаний з труб жаротривкої сталі діаметром $d_1/d_2 = 32/42 \text{ мм}$. Коефіцієнт теплопровідності матеріалу $\lambda = 14 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$. Температура зовнішньої поверхні труби $t_{c2} = 580^{\circ}\text{C}$, внутрішньої — $t_{c1} = 450^{\circ}\text{C}$. Визначити щільність теплового потоку q_1 1 м довжини.

Рішення. Лінійна щільність теплового потоку визначається по формулі

$$q_1 = \frac{(t_{c1} - t_{c2})\pi}{1/2\lambda \ln r_2/r_1} = \frac{(t_{c1} - t_{c2})\pi}{2,3/2\lambda \lg d_2/d_1} = \frac{3,14 \cdot (450 - 580)}{0,5 \cdot 14 \cdot 2,3 \lg 42/32} = -42100 \text{ Вт/м.}$$

Знак «-» показує, що тепловий потік q_1 направлений всередину труби.

Задача 3. Яка кількість теплоти передається через залізне ребро $\delta = 5 \text{ мм}$; $h = 50 \text{ мм}$; $l = 1 \text{ м}$ і який температурний напір ϑ_2 на кінці ребра, якщо $\lambda = 50 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$; $\alpha_1 = \alpha_2 = 10 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ і $\vartheta_1 = 80^{\circ}\text{C}$.

Рішення

1. Темп охолодження: $m = \sqrt{\frac{2\alpha}{\lambda\delta}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 10}{50 \cdot 0,005}} = 8,95 \text{ м}^{-1}$

$$mh = 8,95 \times 0,05 = 0,447$$

2. $\text{ch}(mh) = \text{ch}(0,447) = 1,1$

3. $\vartheta_2 = \vartheta_1 \frac{1}{\text{ch}(mh)} = 80 \cdot \frac{1}{1,1} = 72,7^{\circ}\text{C}$

4. $Q = \lambda m f \vartheta_1 \cdot th(mh) = 50 \cdot 8,95 \cdot 0,005 \cdot 80 \cdot 0,42 = 75,5 \text{ Вт}$

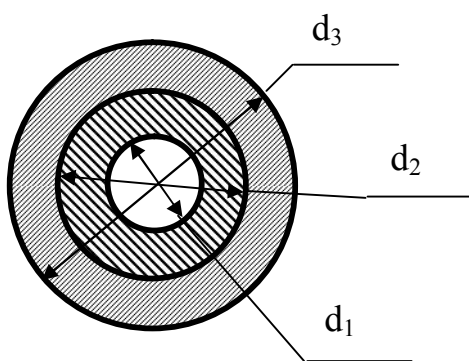
За більш точними формулами:

$$\vartheta_2 = \vartheta_1 \frac{1}{\text{ch}(mh) + \frac{\alpha_2}{m\lambda} \text{sh}(mh)} = \frac{80}{1,1 + \frac{10}{8,95 \cdot 50} \cdot 0,46} = 71,5^{\circ}\text{C}$$

$$Q = \lambda m f \vartheta_1 \frac{\frac{\alpha_2}{m\lambda} + th(mh)}{1 + \frac{\alpha^2}{m\lambda} th(mh)} = 50 \cdot 8,95 \cdot 0,005 \cdot 80 \frac{\frac{10}{8,95 \cdot 50} + 0,42}{1 + \frac{10}{8,95 \cdot 50} \cdot 0,42} = 79 \text{ Вт}$$

Задача 4. Трубопровід із зовнішнім діаметром 70 мм і теплопровідністю 40 Вт/(м·К) має двошарову теплову ізоляцію $\delta_1 = 20$ мм, $\lambda_1 = 0,04$ Вт/(м·К), $\delta_2 = 30$ мм, $\lambda_2 = 0,08$ Вт/(м·К). Визначити відносне значення кожного з ізоляційних шарів в тепловому ефекті конструкції. Як зміниться ефективність теплової ізоляції, якщо змінити товщини шарів на $\delta_1 = 30$ мм і $\delta_2 = 20$ мм?

Розв'язок
Варіант 1



$$d_2 = d_1 + 2\delta_1 = 70 + 2 \cdot 20 = 110 \text{ мм}$$

$$d_3 = d_2 + 2\delta_2 = 110 + 2 \cdot 30 = 170 \text{ мм}$$

$$R_{iz1} = \frac{1}{2\pi\lambda_1} \ln \frac{d_2}{d_1} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 0,04} \ln \left(\frac{110}{70} \right) = 1,8$$

$$R_{iz2} = \frac{1}{2\pi\lambda_2} \ln \frac{d_3}{d_2} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 0,08} \ln \left(\frac{170}{110} \right) = 0,87$$

$$\Sigma R = R_{iz1} + R_{iz2} = 1,8 + 0,87 = 2,67 \text{ (м}^2 \cdot \text{К)/Вт.}$$

$$1 \text{ шар } 1,8/2,67=67,4\% \quad 2 \text{ шар } 0,87/2,67=32,6\%$$

Варіант 2

$$d_2 = d_1 + 2\delta_1 = 70 + 2 \cdot 30 = 130 \text{ мм}$$

$$d_3 = d_2 + 2\delta_2 = 130 + 2 \cdot 20 = 170 \text{ мм}$$

$$R_{iz1} = \frac{1}{2\pi\lambda_1} \ln \frac{d_2}{d_1} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 0,04} \ln \left(\frac{130}{70} \right) = 2,46$$

$$R_{iz2} = \frac{1}{2\pi\lambda_2} \ln \frac{d_3}{d_2} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 0,08} \ln \left(\frac{170}{130} \right) = 0,53$$

$$\Sigma R = R_{iz1} + R_{iz2} = 2,46 + 0,53 = 3,0 \text{ (м}^2 \cdot \text{К)/Вт.}$$

$$1 \text{ шар } 2,46/3 = 82\% \quad 2 \text{ шар } 0,53/3 = 18\%$$

Другий варіант є кращим.

Задача 5. Дріт діаметром 3 мм з питомим електричним опором 0,004 Ом/м має ізоляцію завтовшки 1 мм з теплопровідністю 0,15 Вт/(м·К). Визначити припустиму силу струму за умови, що температура на краях ізоляції не повинна перевищувати 70 і 45°C.

Розв'язок

1 Лінійний тепловий потік теплопровідності:

$$q_{\ell} = \frac{t_{i1} - t_{i2}}{\frac{1}{2\pi\lambda} \ln\left(\frac{d_{i2}}{d_{i1}}\right)} = \frac{70 - 40}{\frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 0,15} \ln\left(\frac{3 + 2 \cdot 1}{3}\right)} = 55 \text{ Вт/м};$$

2 За законом Джоуля-Ленца:

$$q_{\ell} = I^2 r_{\ell}; \quad I = \sqrt{\frac{q_{\ell}}{r_{\ell}}} = \sqrt{\frac{55}{0,004}} = 117 \text{ А}$$

Задача 6. Поверхня нагріву ТА виготовлена з латунних труб діаметрами 43/38 мм загальною довжиною 30м. Латунні труби потрібно замінити стальними з діаметрами 50/44 мм. Яку довжину повинні мати стальні труби, щоб забезпечити сталу тепловидатність, якщо коефіцієнти теплопровідності латуні та сталі дорівнюють 85 і 50 Вт/(м·К) відповідно, а різниця температур на поверхнях труб 0,1 і 0,2 °С відповідно.

Розв'язок

1 Теплові потоки через латунний і стальний ТА відповідно:

$$Q_{\Lambda} = \frac{2\pi\ell_{\Lambda}\Delta t_1}{\frac{1}{\lambda_{\Lambda}} \ln\left(\frac{d_{2\Lambda}}{d_{1\Lambda}}\right)} \quad Q_c = \frac{2\pi\ell_c\Delta t_2}{\frac{1}{\lambda_c} \ln\left(\frac{d_{2c}}{d_{1c}}\right)}$$

2 Прирівняємо їх і визначимо довжину нових труб

$$\begin{aligned} \frac{2\pi\ell_{\Lambda}\Delta t_1}{\frac{1}{\lambda_{\Lambda}} \ln\left(\frac{d_{2\Lambda}}{d_{1\Lambda}}\right)} &= \frac{2\pi\ell_c\Delta t_2}{\frac{1}{\lambda_c} \ln\left(\frac{d_{2c}}{d_{1c}}\right)} \\ \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 30 \cdot 0,1}{\frac{1}{85} \ln \frac{43}{38}} &= \frac{2 \cdot 3,14 \cdot \ell_c \cdot 0,2}{\frac{1}{50} \ln \frac{50}{44}} \\ \ell_c &= 26,4\text{м}. \end{aligned}$$

Задача 7. В трубопроводі з діаметрами 60/54 мм тече рідина із швидкістю 0,5 м/с, температура якої зменшується в середньому на 0,2 °С/м довжини труби. Визначити температуру зовнішньої поверхні труби, якщо температура внутрішньої стінки 75°С, теплопровідність труби 2 Вт/(м·К), а фізичні властивості рідини складають $\rho = 1100 \text{ кг/м}^3$; $C_p = 3,5 \text{ кДж/(кг·К)}$.

Розв'язок

1 Об'ємна та масова витрати води в трубі:

$$\begin{aligned} V &= w \cdot s = \frac{\pi \cdot d^2}{4} w = 3,14 \frac{0,054^2}{4} 0,5 = 0,00115 \text{ м}^3 / \text{с} \\ G &= V \cdot \rho = 0,00115 \cdot 1100 = 1,26 \text{ кг / с} \end{aligned}$$

2 Лінійний тепловий потік, з рівняння теплового балансу:

$$q_{\ell} = C_p \cdot \Delta t \cdot G = 3,5 \cdot 0,2 \cdot 1,26 = 0,88 \text{ кВт/м}$$

3 Лінійний тепловий потік теплопровідності:

$$q_{\ell} = \frac{2\pi\lambda(t_{c2} - t_{c1})}{\ln \frac{d_2}{d_1}};$$

4 Звідси, знаючи тепловий потік:

$$t_{c2} - t_{c1} = \frac{q_{\ell}}{2\pi\lambda} \cdot \ln \frac{d_2}{d_1} = \frac{880 \cdot \ln \frac{60}{54}}{2 \cdot 3,14 \cdot 2} = 7,38 \text{ }^{\circ}\text{C};$$

$$t_{c1} = t_{c2} - 7,38 = 75 - 7,38 = 67,6 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Задача 8. Трубопровід необхідно ізолювати таким чином, щоб температура зовнішньої поверхні ізоляції не перевищувала 40°C при температурі навколишнього середовища 20°C і за питомого теплового потоку 100 Вт/м. Чи доцільно робити ізоляцію з азбесту ($\lambda = 0,1 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$) якщо зовнішній діаметр ізоляції 200 мм, а зовнішній діаметр труби 50 мм.

Розв'язок

1 Лінійний тепловий потік тепловіддачі через поверхню ізоляції:

$$q_{\ell} = \frac{\pi(t_{ci} - t_n)}{\frac{1}{\alpha \cdot d_3}};$$

2 Звідси, коефіцієнт тепловіддачі:

$$\alpha = \frac{q_{\ell}}{d_3 \cdot \pi \cdot (t_{ci} - t_n)} = \frac{100}{0,2 \cdot 3,14 \cdot (40 - 20)} = 7,96 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$$

3 Для доцільності установки теплоізоляції із заданою теплопровідністю необхідно, щоб виконувалась нерівність.

$$\lambda_i < \frac{\alpha \cdot d_2}{2}; \quad 0,1 < \frac{7,96 \cdot 0,05}{2} = 0,199$$

Нерівність виконується. Ізоляцію ставити доцільно.

Задачі для самостійного рішення

№1

Визначити тепловий потік через бетонну стіну товщиною 400 мм, висотою 5000 мм, довжиною 4000 мм якщо температура на її внутрішній поверхні 20 °С, а на зовнішній 0 °С. Коефіцієнт теплопровідності бетону 1,0 Вт/м К.

№2

Пароперегрівник виконаний з труб жаротривкої сталі діаметрами $d_1/d_2=32/42$ мм. Коефіцієнт теплопровідності матеріалу $\lambda=14$ Вт/м К. Темпера-

тура зовнішньої поверхні труби 580°C , внутрішньої 450°C . Визначити щільність теплового потоку на 1 м довжини.

№3

Сталева стінка парового котла товщиною 5 мм вкрита з одного боку шаром сажі товщиною 0,2 мм, а з другого – шаром накипу товщиною 3 мм. Через стінку проходить питомий тепловий потік $q=10000 \text{ Вт/м}^2$. Визначити загальний термічний опір і загальне падіння температури стінки.

№4

Визначити втрату тепла через дощаний пол. Довжиною 4 м, шириною 3 м і товщиною 300 мм, якщо на поверхні підтримується температура $t_1=20^{\circ}\text{C}$, $t_2=4^{\circ}\text{C}$ і коефіцієнт теплопровідності $\lambda=0,35 \text{ Вт/м}^2 \text{ К}$.

№5

Визначити втрату тепла через цегляну стінку довжиною 5 м, висотою 3 м і товщиною 250 мм, якщо на поверхні стінки підтримується температура $t_1=20^{\circ}\text{C}$, $t_2=-20^{\circ}\text{C}$ і коефіцієнт теплопровідності $\lambda=0,98 \text{ Вт/м}^2 \text{ К}$.

10 Конвективний теплообмін

Задача 1. Обчислити тепловий потік до горизонтальної трубки парового підігрівача води для гарячого водопостачання. Довжина трубки $l=2 \text{ м}$, зовнішній діаметр $d_n=36 \text{ мм}$, температура стінки $t_c=129^{\circ}\text{C}$, на трубці конденсується насичена водяна пара, $p_n=0,6 \text{ МПа}$. Середній по поверхні коефіцієнт тепловіддачі $\alpha \approx 10000 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$.

Розв'язок

Тепловий потік Q , Вт, може бути обчислений за формулою

$$Q = \alpha F (t_n - t_c).$$

Температура насичення t_n визначається по таблиці: при $p_n=0,6 \text{ Мпа}$, $t_n=158,8^{\circ}\text{C}$.

$$Q = 10000 \cdot 3,14 \cdot 0,036 \cdot 2 \cdot (158,8 - 129) = 67,8 \cdot 10^3 \text{ Вт}.$$

Задача 2. На зовнішній поверхні труби кипить вода з тиском 2,279 МПа. Теплове навантаження на поверхні труби складає $q=2,56 \cdot 10^5 \text{ Вт/м}^2$. Визначити температуру поверхні труби для чистої поверхні труби і якщо вона покрита шаром накипу товщиною $\delta=0,5 \text{ мм}$ з коефіцієнтом теплопровідності $1,163 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$.

Розв'язок

1 Для $P=2,279 \text{ МПа}$ $t_n=230^{\circ}\text{C}$.

2 Для α використаємо формулу: $\alpha = 4,34q^{0,7} (P^{0,14} + 1,35 \cdot 10^{-2} P^2)$ - кипіння у великому об'ємі.

3 Температура на чистій поверхні труби з формули: $q = \alpha(t_c - t_n)$

4 Температура стінки, покрита накипом t'_c з формули: $q = \frac{t'_c - t_c}{\frac{\delta}{\lambda}}$

Задача 3. Визначити коефіцієнт тепловіддачі для руху киплячої води в трубі діаметром 25/20 мм з швидкістю 1,2 м/с, якщо температура на внутрішній поверхні труби 200°C, а вода під тиском 1,2553 МПа.

Розв'язок

1 Для вимушеного кипіння в трубах рідини з паровмістом не більше 70%, тепловіддачу можна виразити із залежності: $\alpha/\alpha_w = f(\alpha_q/\alpha_w)$, де:

α - коефіцієнт тепловіддачі киплячої рідини з врахуванням її руху;

α_w - коефіцієнт тепловіддачі однофазної рідини із швидкістю w

α_q - коефіцієнт тепловіддачі для розвинутого бульбашкового кипіння в умовах вільної конвекції.

Для $\frac{\alpha_q}{\alpha_w} < 0,5$ процес кипіння не впливає на теплообмін, в цьому випадку

$$\alpha = \alpha_w.$$

Для $\frac{\alpha_q}{\alpha_w} > 2$ інтенсивність тепловіддачі визначається тільки кипінням, у

цьому випадку $\alpha = \alpha_q$.

Для області, де коефіцієнт тепловіддачі залежить від швидкості і теплового навантаження: $\frac{\alpha_q}{\alpha_w} = 0,5 \div 2$ рекомендовано наступна інтерполяційна формула:

$$\frac{\alpha}{\alpha_w} = \frac{4\alpha_w + \alpha_q}{5\alpha_w - \alpha_q}$$
 Всі ці формули справедливі для води з швидкостями 0,2-6,7 м/с.

2 Коефіцієнт тепловіддачі для руху однофазної рідини:

для $P=1,2553$ МПа: $t_n=190^\circ\text{C}$; $\lambda=0,67$ Вт/(м·К); $\nu=0,165 \cdot 10^{-6}$ м²/с; $Pr=0,96$ і для $t_c=200^\circ\text{C}$ $Pr_c=0,93$.

Критерій $Re = wd/\nu = 1,2 \cdot 2 \cdot 10^{-2} / (0,165 \cdot 10^{-6}) = 1,415 \cdot 10^5 > 10^4$ - турб. реж.

тоді: $Nu = 0,021 Re^{0,8} Pr^{0,43} (Pr/Pr_c)^{0,25} = 0,021 \cdot (1,415 \cdot 10^5)^{0,8} \cdot 0,96^{0,43} \cdot (0,96/0,93)^{0,25} = 261$

а
$$\alpha_w = \frac{Nu \cdot \lambda}{d} = 261 \cdot 0,67 / (2 \cdot 10^{-2}) = 8730 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$$

3 Коефіцієнт тепловіддачі для бульбашкового кипіння у великому об'ємі:

$$\alpha = 4,34q^{0,7} (P^{0,14} + 1,35 \cdot 10^{-2} P^2), \text{ підставимо замість } q = \alpha \Delta t: \text{отримаємо:}$$

$$\alpha = 4,34(\alpha \Delta t)^{0,7} (P^{0,14} + 1,35 \cdot 10^{-2} P^2), \text{ звідки:}$$

$$\alpha = (4,34\Delta t^{0,7} (P^{0,14} + 1,35 \cdot 10^{-2} P^2))^{3,3} = \text{Вт}/(\text{м}^2/\text{К})$$

$$= (4,34 \cdot 10^{0,7} (1,2553^{0,14} + 1,35 \cdot 10^{-2} \cdot 1,2553^2))^{0,33} = 30794$$

4 Визначаємо відношення коефіцієнтів тепловіддачі:

$$\frac{\alpha_q}{\alpha_w} = \frac{30794}{8730} = 3,53 > 2$$

З цього співвідношення видно, що інтенсивність тепловіддачі визначається тільки кипінням, тобто $\alpha = \alpha_q = 30794 \text{ Вт}/(\text{м}^2/\text{К})$.

Задача 4. Як зміниться коефіцієнт тепловіддачі, якщо для умов попередньої задачі температуру внутрішньої стінки труби знизити до 195°C ?

Розв'язок

1 Для $t_c = 195^\circ\text{C}$ $\text{Pr}_c = 0,945$.

$$\text{Nu} = 0,021 \text{Re}^{0,8} \text{Pr}^{0,43} (\text{Pr}/\text{Pr}_c)^{0,25} = 0,021 \cdot (1,415 \cdot 10^5)^{0,8} \cdot 0,96^{0,43} \cdot (0,96/0,945)^{0,25} \approx 261$$

а
$$\alpha_w = \frac{\text{Nu} \cdot \lambda}{d} = 261 \cdot 0,67 / (2 \cdot 10^{-2}) = 8730 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}),$$

2 Коефіцієнт тепловіддачі для бульбашкового кипіння у великому об'ємі:

$$\alpha = (4,34\Delta t^{0,7} (P^{0,14} + 1,35 \cdot 10^{-2} P^2))^{3,3} = \text{Вт}/(\text{м}^2/\text{К})$$

$$= (4,34 \cdot 5^{0,7} (1,2553^{0,14} + 1,35 \cdot 10^{-2} \cdot 1,2553^2))^{0,33} = 6212$$

3 Визначаємо відношення коефіцієнтів тепловіддачі:

$$\frac{\alpha_q}{\alpha_w} = \frac{6212}{8730} = 0,71 < 2$$

4 Тоді коефіцієнт тепловіддачі залежить як від вимушеного руху рідини так і від кипіння і визначається:

$$\frac{\alpha}{\alpha_w} = \frac{4\alpha_w + \alpha_q}{5\alpha_w - \alpha_q} = \frac{4 \cdot 8730 + 6212}{5 \cdot 8730 - 6212} = 1,098,$$

і $\alpha = 1,098 \cdot 8730 = 9585 \text{ Вт}/(\text{м}^2/\text{К})$.

Задача 5. Визначити як підвищиться інтенсивність теплопередачі за рахунок оребрення зовнішньої поверхні з коефіцієнтом оребрення $\beta = 1,5$, якщо коефіцієнти тепловіддачі з внутрішньої і зовнішньої сторони поверхні складають 800 і $10 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. $\delta = 0,01 \text{ м}$; $\lambda = 50 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$.

Розв'язок

$$K_1 = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}};$$

$$K_2 = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2 \cdot \beta}}.$$

Задача 6. Випарна труба діаметром 38/28 з теплопровідністю 50 Вт/(м·К) зовні обігривається газами з температурою 1000°C, а всередині охолоджується водою з температурою 250°C. Визначити, як зміниться температура стінок при відкладенні в трубі шару накипу завтовшки 1 мм з теплопровідністю 0,5 Вт/(м·К), якщо коефіцієнт тепловіддачі від газів 500 Вт/(м²·К), а до води втричі більший.

Розв'язок

$$1 \quad q_{\ell} = \frac{\pi \cdot \Delta t}{\frac{1}{\alpha_1 d_1} + \frac{1}{2\lambda_1} \ln\left(\frac{d_2}{d_1}\right) + \frac{1}{\alpha_2 d_2}} = \frac{3,14 \cdot (1000 - 250)}{\frac{1}{3 \cdot 500 \cdot 0,028} + \frac{1}{2 \cdot 50} \ln\left(\frac{38}{28}\right) + \frac{1}{500 \cdot 0,038}} = 29624 \text{ Вт/м.}$$

Задача 7. Над горизонтальною поверхнею води рухається повітря із швидкістю 3,1 м/с. Температура поверхні води 15°C, повітря подалі від поверхні 20°C, відносна вологість $\varphi=0,35$. Довжина поверхні води у напрямку руху повітря $\ell=0,1$ м. Тиск повітря $P=98000$ Па. Визначити кількість води G_w що випаровується з 1 м² поверхні за 1 секунду.

Розв'язок

$$1 \quad D = 2,31 \cdot 10^{-5} \left(\frac{98000}{P}\right) \left(\frac{T_b}{T_0}\right)^{1,81}$$

$$2 \quad v_b = (0,101t_b + 13,7) \frac{98000}{P} \cdot 10^{-6}$$

$$3 \quad Pr_D = \frac{\nu}{D} \quad Re_b = \frac{w \cdot \ell}{v_b}$$

$$4 \quad Nu_D = 0,66 \cdot Re_b^{0,5} Pr_D^{0,33}$$

$$5 \quad \beta = \frac{Nu_D \cdot D}{\ell}$$

$$6 \quad Pn_{(tw)} = 133,32 \cdot 10^{\frac{8,12 \cdot tw + 156}{tw + 236}}$$

$$7 \quad Pn_{(tb)} = 133,32 \cdot 10^{\frac{8,12 \cdot tb + 156}{tb + 236}}$$

$$8 \quad Pnb = Pn_{(tb)} \cdot \varphi$$

$$9 \quad G_w = \beta \cdot (\rho n_{(tw)} - \rho nb) = \beta \left[\frac{P_{n(tw)}}{R_n T_w} - \frac{P_{nb}}{R_n T_b} \right]$$

Задача 8. Визначити аеродинамічний опір насадки й кількість переданої теплоти при підігріві $G_w=4$ кг/с води в контактному економайзері при початковій температурі води $t'_b=10^\circ\text{C}$. Показник якості переданої повної теплоти складає $E_M=0,884$, зниження температури продуктів згоряння 20°C при їх початковій температурі $t'_m=60^\circ\text{C}$, відношення витратних теплоємностей $W_w=6,91$, коефіцієнт випаровування $K_{иm}=4,38$, кут гофрування $\alpha=130^\circ$, швидкість газів у насадці $w_r=2,72$ м/с, $Re^*=0,519$, густина газів $\rho_r=1,02$ кг/м³.

Розв'язок

$$1 \ E_M = 1 - \frac{t_b'' - t_b'}{t_M' - t_b'}$$

$$2 \ Q = G_b C p_b (t_b'' - t_b')$$

$$3 \ E_M = 1,412 - 0,439 \text{Re}^* + 0,036 \text{Bw} - 0,072 \text{Ки}_M - 0,033 \text{L} + 0,0021 \alpha$$

$$4 \ \text{Eu} = 3,4 \cdot 10^7 (\text{Re}^*)^{0,7} (\text{Bw})^{-0,078} (\text{Ки}_M)^{0,13} \text{L}^{1,027} \alpha^{-3,5}$$

$$5 \ \Delta p = \text{Eu} \cdot \rho_r w_r^2$$

Задача 9. В контактному економайзері підігривається вода з витратою $G_b=4$ кг/с. Початкова температура води $t_b'=10^\circ\text{C}$. Кількість переданої теплоти $Q=0,6$ МВт. Визначити кількість ступенів насадки, якщо температура газів на вході $t_M'=60^\circ\text{C}$, виході $t_M''=40^\circ\text{C}$, відносне значення критерію Рейнольдса $\text{Re}^*=0,519$, коефіцієнт випаровування $\text{Ки}_M=4,38$, відношення витратних теплоємностей $\text{Bw}=6,91$, кут гофрування $\alpha=130^\circ$. Визначити також аеродинамічний опір насадки при швидкості газів $w_r=2,72$ м/с, густина газів $\rho_r=1,02$ кг/м³.

Розв'язок

$$1 \ t_b'' = \frac{Q + G_b C p_b t_b'}{G_b C p_b}$$

$$2 \ E_M = 1 - E_{KM} = 1 - \frac{t_b'' - t_b'}{t_M' - t_b'}$$

$$3 \ E_M = 1,412 - 0,439 \text{Re}^* + 0,036 \text{Bw} - 0,072 \text{Ки}_M - 0,033 \text{L} + 0,0021 \alpha$$

$$4 \ \text{Eu} = 3,4 \cdot 10^7 (\text{Re}^*)^{0,7} (\text{Bw})^{-0,078} (\text{Ки}_M)^{0,13} \text{L}^{1,027} \alpha^{-3,5}$$

$$5 \ \Delta p = \text{Eu} \cdot \rho_r w_r^2$$

Задача 10. Аеродинамічний опір насадки при контактному підігріві рідини витратою 4 кг/с складає $\Delta p=11$ Па при швидкості газів $w_r=2,72$ м/с, та їх густині $\rho_r=1,02$ кг/м³. Визначити кінцеву температуру води та кількість переданої теплоти, якщо початкова температура рідини складає $t_b'=10^\circ\text{C}$, наявний температурний напір 50°C , кінцева температура парогазової суміші $t_r''=40^\circ\text{C}$, відносне значення критерію Рейнольдса $\text{Re}^*=0,519$, коефіцієнт випаровування $\text{Ки}_M=4,38$, відношення витратних теплоємностей $\text{Bw}=6,91$, кут гофрування $\alpha=130^\circ$.

Розв'язок

$$1 \ \text{Eu} = \frac{\Delta p}{\rho w^2}$$

$$2 \ 4 \ \text{Eu} = 3,4 \cdot 10^7 (\text{Re}^*)^{0,7} (\text{Bw})^{-0,078} (\text{Ки}_M)^{0,13} \text{L}^{1,027} \alpha^{-3,5}$$

$$3 \ E_M = 1,412 - 0,439 \text{Re}^* + 0,036 \text{Bw} - 0,072 \text{Ки}_M - 0,033 \text{L} + 0,0021 \alpha$$

$$4 \ E_M = 1 - E_{KM} = 1 - \frac{t_b'' - t_b'}{t_M' - t_b'}$$

$$5 \ Q = G_b C p_b (t_b'' - t_b')$$

Задачі для самостійного рішення

№1

Тепловий потік від пари, що конденсується у конденсаторі, до стінки труби дорівнює 120000 Вт/м^2 при температурі пари 60°C . Визначити температуру на внутрішній поверхні трубки конденсатора, прийнявши коефіцієнт пропорційності $\alpha = 8000 \text{ Вт/м}^2 \text{ К}$.

№2

Визначити кількість тепла і поверхню нагріву теплообмінника для нагріву 500 кг/год води від 10°C до 70°C . Коефіцієнт теплопередачі $k=200 \text{ Вт/м}^2 \text{ К}$, теплоємність води $C_p=4,19 \text{ кДж/кг}$, середній температурний напір $\Delta t_{\text{сер}}=45^\circ\text{C}$.

11 Променистий теплообмін

Задача 1. Визначити тепловий потік випромінюванням між вертикальною плитою заввишки 4 м , шириною 10 м , з температурою $t_{c1} = 100^\circ\text{C}$ і що знаходиться на деякій відстані від неї вертикальною стіною з температурою $t_{c2} = 20^\circ\text{C}$. Ступінь чорноти плити і стінки прийняти однаковою: $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0,9$

Розв'язок

$$Q = \frac{\sigma_0}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} F \left[\left(\frac{T_{c1}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{c2}}{100} \right)^4 \right] = \frac{5,67}{\frac{1}{0,9} + \frac{1}{0,9} - 1} \cdot 40 \left[(3,74)^4 - (2,93)^4 \right] = 22,68 \cdot 10^3 \text{ Вт.}$$

Задача 2. Визначити питомий тепловий потік між двома паралельними пластинами з температурою $t_1 = 280^\circ\text{C}$, $t_2 = 23^\circ\text{C}$, якщо міри чорноти пластин: $\varepsilon_1=0,8$; $\varepsilon_2 = 0,6$.

Дані для розрахунку взяти з таблиці.

Остання цифра шифру	t_1	t_2	Передостання цифра шифру	ε_1	ε_2
0	280	23	9	0,6	0,5
1	450	100	8	0,2	0,1
2	175	93	7	0,3	0,2
3	436	25	6	0,4	0,9
4	279	15	5	0,1	0,6
5	315	45	4	0,5	0,5
6	801	114	3	0,7	0,3
7	156	106	2	0,8	0,7
8	115	17	1	0,9	0,3
9	345	34	0	0,3	0,9

Розв'язок

1 Приведена міра чорноти системи:

$$\varepsilon_{np} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} = \frac{1}{\frac{1}{0,8} + \frac{1}{0,6} - 1} = 0,52;$$

2 Питомий тепловий потік:

$$q = \varepsilon_{np} \cdot C_0 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] = 0,52 \cdot 5,67 \left[\left(\frac{280 + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{23 + 273}{100} \right)^4 \right] = 2539 \text{ Вт/м}^2$$

Задача 3. Визначити втрати теплоти шляхом випромінювання сталієм паропроводом діаметром 50 мм і довжиною 4 м, при температурі поверхні труби $t_1 = 327^\circ\text{C}$, якщо труба знаходиться у великому приміщенні, температура стінок якого $t_2 = 25^\circ\text{C}$. Міра чорноти труби 0,6.

Розв'язок

1 Тепловий потік випромінюванням:

$$q_\ell = \varepsilon_{np} \cdot C_0 \cdot \pi \cdot d \cdot \ell \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] = 0,6 \cdot 5,67 \left[\left(\frac{327 + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{25 + 273}{100} \right)^4 \right] = 36$$

Задача 3. Обмурівка топочної камери парового котла виконана з шамотної цегли, а зовнішні обшивка з листової сталі. Відстань між обшивкою і цегляною кладкою $\delta = 50$ мм і її можна вважати малою в порівнянні з розмірами стін топки. Визначити втрати теплоти в навколишнє середовище з одиниці поверхні в одиницю часу в умовах сталого режиму за рахунок променистого теплообміну між поверхнею обмурівки та обшивки. Температура зовнішньої поверхні обмурівки $t_1 = 400^\circ\text{C}$, а температура сталі обшивки $t_2 = 50^\circ\text{C}$. Міра чорноти шамоту 0,85, листової сталі 0,45. Як зміниться тепловий потік, якщо між обмурівкою та обшивкою встановити екран з $\varepsilon_e = 0,2$.

Розв'язок

1 Приведена міра чорноти

$$\varepsilon_{np} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} = \frac{1}{\frac{1}{0,85} + \frac{1}{0,45} - 1} = 0,42;$$

2 Тепловий потік випромінюванням

$$q = \varepsilon_{np} \cdot C_0 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] = 0,42 \cdot 5,67 \left[\left(\frac{673}{100} \right)^4 - \left(\frac{323}{100} \right)^4 \right] = 4626$$

3 Приведена міра чорноти з додаванням екрана

$$\varepsilon_{npe} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} 2 \left(\frac{1}{\varepsilon_e} - 1 \right)} = \frac{1}{\frac{1}{0,85} + \frac{1}{0,45} + 2 \left(\frac{1}{0,2} - 1 \right)} = 0,087;$$

4 Тепловий потік випромінюванням з додаванням екрана

$$q = \varepsilon_{\text{нре}} \cdot C_0 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] = 0,088 \cdot 5,67 \left[\left(\frac{673}{100} \right)^4 - \left(\frac{323}{100} \right)^4 \right] = 966$$

Задача 4. Визначити витрати теплоти шляхом випромінювання з поверхні сталеві труби $d = \text{мм}$, $\ell = \text{м}$ при температурі поверхні труби $t_1 = \text{°C}$, якщо труба знаходиться у великому приміщенні, температура стінок якого $t_2 = \text{°C}$. Міра чорноти труби ε . Дані для розрахунку взяти з таблиці.

Остання цифра шифру	$t_1, \text{°C}$	$t_2, \text{°C}$	Передостання цифра шифру	ε	$d, \text{м}$	$\ell, \text{м}$
1	327	25	0	0,6	0,05	4
2	298	24	1	0,8	0,06	5
3	420	36	2	0,2	0,03	5
4	344	15	3	0,5	0,08	10
5	50	10	4	0,8	0,05	5
6	136	29	5	0,6	0,04	8
7	217	43	6	0,9	0,05	7
8	194	14	7	0,8	0,06	8
9	238	10	8	0,4	0,04	6
0	273	15	9	0,55	0,1	12

Розв'язок

1 Оскільки труба знаходиться у великому приміщенні, приведена міра чорноти системи дорівнює міні чорноти труби.

2 Тепловий потік:

$$Q = q_\ell \cdot \ell = \varepsilon \cdot C_0 \cdot \pi \cdot d \cdot \ell \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] = 0,6 \cdot 5,67 \cdot 3,14 \cdot 0,05 \cdot \left[\left(\frac{600}{100} \right)^4 - \left(\frac{298}{100} \right)^4 \right] =$$

Задачі для самостійного рішення

№1

Визначити тепловий потік випромінюванням між вертикальною плитою заввишки 4 м, шириною 10 м, з температурою $t_{c1} = 100 \text{ °C}$ і між вертикальною стіною, що знаходиться на деякій відстані від неї, з температурою $t_{c2} = 20 \text{ °C}$. Ступінь чорноти плити і стінки прийняти однаковою: $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0,9$.

12. Теплообмінні апарати

Задача 1. Розрахувати коефіцієнт теплопередачі через обмурівку парогенератора, що обмивається зсередини димовими газами $\alpha_1 = 25 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$,

а зовні — повітрям, $\alpha_2 = 10 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ Обмурівка складається з двох шарів: вогнетривкої цеглини ($\delta_1 = 400 \text{ мм}$) і червоної цегли ($\delta_2 = 500 \text{ мм}$.)

Коефіцієнт теплопровідності вогнетривкої цегли $\lambda_1 = 1,16 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$, для червоної цегли $\lambda_2 = 0,58 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$

Рішення.

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum_1^n \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{1}{\alpha_2}} = \frac{1}{\frac{1}{25} + \frac{0,4}{1,16} + \frac{0,5}{0,58} + \frac{1}{10}} = 0,79 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Задача 2. З сільської котельної у водоводяний теплообмінник, встановлений на фермі КРС, поступає вода з початковою температурою $t'_1 = 110^\circ \text{С}$. Температура зворотної води повинна бути не нижче $t''_1 = 70^\circ \text{С}$.

Для внутрішньофермерських потреб (миття устаткування, душова, підмивання вимені тварин і т. п.) потрібно в годину $0,8 \text{ м}^3$ води з температурою $t''_2 = 65^\circ \text{С}$. Рахуючи початкову температуру води, що нагрівається $t''_1 = 10^\circ \text{С}$, треба визначити витрату гріючої води G_r , кількість теплоти Q , що передається від гріючої води до підігріваємої, і площу поверхні нагріву при прямооточній схемі руху теплоносіїв, рахуючи коефіцієнт теплопередачі $K = 1700 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

Рішення. Тепловий баланс для такого теплообмінника буде

$$G_r \cdot c_w (t'_1 - t''_1) = G_n \cdot c_w (t''_2 - t'_2)$$

де c_w — масова теплоємність води $\approx 4,18 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$, G_n - маса води, що нагрівається $\approx 800 \text{ кг}/\text{год}$.

$$G_r = \frac{G_n (t''_2 - t'_2) \cdot c_w}{(t'_1 - t''_1) \cdot c_w} = \frac{800(65 - 10)}{(110 - 70)} = \frac{44000}{40} = 1100 \text{ кг}/\text{год}.$$

Кількість теплоти, що передається від гріючої води до тієї, що нагрівається, наступне:

$$Q_r = G_r \cdot c_w (t'_1 - t''_1) = 183920 \text{ кДж}/\text{год} = 51 \text{ кДж}/\text{с} = 51 \text{ кВт}.$$

Площа поверхні теплообміну при прямооточії визначається по рівняннях

$$F = \frac{Q_r}{K \cdot \Delta t} = \frac{51000}{1700 \cdot \Delta t}, \text{ м}^2,$$

$$\Delta t = \frac{\Delta t^{\text{с}} - \Delta t^{\text{м}}}{2,3 \lg \frac{\Delta t^{\text{с}}}{\Delta t^{\text{м}}}} = \frac{(t'_1 - t'_2) - (t''_1 - t''_2)}{2,3 \lg \frac{t'_1 - t'_2}{t''_1 - t''_2}} = \frac{(110 - 10) - (70 - 65)}{2,3 \lg \frac{100}{5}} = 31,66^\circ \text{С}.$$

$$F = \frac{51000}{1700 \cdot 31,66} = 0,95 \text{ м}^2.$$

Задача3. Визначити, до якої температури буде підігріватись вода в протитоківому водоводяному підігрівнику типу “труба в трубі” довжиною 23м. Грійна вода з витратою 2700 кг/год тече в кільцевому каналі, що утворений трубами з діаметром 50/45 і 34/30 мм. Її температура змінюється від 160 до 80°C. Нагрівана вода з витратою 3600 кг/год і початковою температурою 45°C тече у внутрішній трубі. Теплопровідність матеріалу труб 314 Вт/(м·К).

Дано:

$$l = 23\text{м}, G_1 = 2700 \text{ кг/год}, t'_{1} = 160^{\circ}\text{C}, t'_{2} = 45^{\circ}\text{C},$$

$$t''_{1} = 80^{\circ}\text{C}, G_2 = 3600 \text{ кг/год}, \lambda_{\text{тр}} = 314 \text{ Вт/(м·К)}$$

Визначити: t''_{2}

Розв'язок:

1 Визначальні температури: $t_1 = (t'_{1} + t''_{1})/2 = (160 + 80)/2 = 120^{\circ}\text{C}$

$$t_2 \text{ приймаємо рівну } 45^{\circ}\text{C}$$

2 З таблиць визначаємо:

$$C_{p1} = 4,254 \text{ кДж/(кг·К)}; C_{p2} = 4,175 \text{ кДж/(кг·К)};$$

3 Масова витрата грійної води:

$$m_1 = G_1/3600 = 2700/3600 = 0,75 \text{ кг/с};$$

4 Масова витрата нагріваної води:

$$m_2 = G_2/3600 = 3600/3600 = 1,0 \text{ кг/с};$$

5 Водяні еквіваленти:

$$W_1 = m_1 \cdot C_{p1} = 0,75 \cdot 4,254 = 3,19 \text{ Вт/к}$$

$$W_2 = m_2 \cdot C_{p2} = 1,0 \cdot 4,175 = 4,175 \text{ Вт/к}$$

6 Знайдемо кінцеву температуру другого теплоносія:

$$W_1 \cdot \Delta t_1 = W_2 \cdot \Delta t_2 \Rightarrow \Delta t_2 = W_1 \cdot \Delta t_1 / W_2 = 3,19 \cdot (160-80)/4,175 = 61,1^{\circ}\text{C} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow t''_{2} = t'_{2} + \Delta t_2 = 45 + 61,1 = 106,1^{\circ}\text{C}$$

Задача 4. В трубах повітряпідігрівника системи повітряного опалення з діаметром 42/38мм тече грійна вода з витратою 2448 т/год, температура якої змінюється від 150 до 85°C. Кількість труб – 500. В міжтрубному просторі зі швидкістю 7м/с рухається повітря, яке підігрівається від 14 до 21°C.

Теплопровідність матеріалу труб $\lambda=55$ Вт/(м·К). Визначити потужність і необхідну поверхню підігрівника, якщо рух теплоносіїв протитоковий.

Дано:

$$G_1 = 2448 \text{ кг/год}, t'_1 = 150^\circ\text{C}, t''_1 = 80^\circ\text{C},$$

$$t'_2 = 14^\circ\text{C}, t''_2 = 21^\circ\text{C}, \lambda_{\text{тр}} = 55 \text{ Вт/(м·К)}$$

$$n = 500 \text{ шт}; d_2/d_B = 42/38; \omega_2 = 7 \text{ м/с, рух протитоковий}$$

Визначити: Q - ? F - ?

Розв'язок:

1 Кількість теплоти, яка передається при теплообміні:

$$Q = G_1 \cdot C_{\text{рв}} \cdot (t'_1 - t''_1) = 2448 \cdot 1000 \cdot 4,19 \cdot (150 - 85) / 3600 = 185198 \text{ кВт};$$

2 Швидкість грійної води:

$$\omega_2 = v_1 / f_{\text{ж.п.}}$$

Задачі для самостійного рішення

№1

Визначити, до якої температури буде підігріватись вода в протитоковому водоводяному підігрівнику типу “труба в трубі” довжиною 23м. Грійна вода з витратою 2700 кг/год тече в кільцевому каналі, що утворений трубами з діаметром 50/45 і 34/30 мм. Її температура змінюється від 160 до 80°C. Нагрівана вода з витратою 3600 кг/год і початковою температурою 45°C тече у внутрішній трубі. Теплопровідність матеріалу труб 314 Вт/(м·К).

№2

Стальні труби ТА з відносним діаметром $(d_{\text{зн}}/d_{\text{вн}})=1.21$ мають намір замінити на латунні. Яким повинно бути відношення діаметрів нових труб для $q_1 = \text{const}$ і $\Delta t = \text{const}$, якщо теплопровідність латуні вдвічі більша за теплопровідність сталі?

№3

Електричний дріт діаметром 3 мм має ізоляцію завтовшки 1,2 мм. Визначити припустиму силу струму, якщо на краях ізоляції температура не повинна перевищувати 65 і 45°C. Коефіцієнт теплопровідності ізоляції $\lambda=0,175$ Вт/(м·К), а електричний опір дроту $R=0,04$ Ом/м.

№4

Горизонтальну трубу діаметром $d=0,057$ м з температурою стінки $t_c=40^\circ\text{C}$ охолоджують навколишнім повітрям з температурою $t_n=10^\circ\text{C}$. Визначити кількість відведеної теплоти, якщо довжина труби $l=10$ м, а параметри повітря мають такі значення: $\lambda=0,025$ Вт/(м·К), $\nu=17,5 \cdot 10^{-6}$ м²/с; $\text{Pr}=0,7$.

№5

Повітря нагрівають в трубчастому ТА, діаметри труб якого складають $(d_{\text{зн}}/d_{\text{вн}})=33/30$ мм. В трубах рухається повітря з швидкістю $w_{\text{п}}=10$ м/с, а зовні протитоком гарячі гази із швидкістю $w_{\text{п}}=15$ м/с. Яку кількість повітря можна підігріти від 150°C до 200°C і яка поверхня потрібна для цього, якщо температура газів знижується від 450°C до 300°C , а параметри повітря і газу такі: $C_{\text{p}}^{\text{п}}=1$ кДж/(кг·К); $\lambda_{\text{п}}=0,02$ Вт/(м·К); $\nu_{\text{п}}=0,3 \cdot 10^{-5}$ м²/с; $\text{Pr}^{\text{п}}=0,73$; $C_{\text{p}}^{\text{г}}=1,2$ кДж/(кг·К); $\lambda_{\text{г}}=0,033$ Вт/(м·К); $\nu_{\text{г}}=0,5 \cdot 10^{-5}$ м²/с; $\text{Pr}^{\text{г}}=0,73$; витрата газів $G_{\text{г}}=5$ кг/с; теплопровідність труби $\lambda_{\text{т}}=50$ Вт/(м·К).

№6

Визначити питомі теплові втрати через стінку з цегли з $\lambda=0,37$ Вт/(м·К) і завтовшки 450мм, якщо температури на внутрішніх і зовнішніх гранях складають 25°C і -15°C відповідно. Визначити також, як зміняться теплові втрати, якщо зовні на стінку покласти керамічну плитку з $\delta=5$ мм, $\lambda=0,82$ Вт/(м·К), а всередині шар штукатурки з $\delta=12$ мм, $\lambda=0,08$ Вт/(м·К)

№ 7

Визначити необхідну поверхню теплообміну трубчастого повітря-нагрівника системи повітряного опалення потужністю 550 кВт. В трубах з діаметром 52/48мм повітря підігрівається від 15 до 20°C , його швидкість руху 10м/с. Грійна вода зі швидкістю 0,85м/с рухається в міжтрубному просторі і охолоджується від 160 до 80°C . Рух теплоносіїв протитоковий, теплопровідність матеріалу труб $\lambda=45$ Вт/(м·К). Теплопровідність води і повітря, їх коефіцієнти кінематичної в'язкості та критерії Прандтля, відповідно: $\lambda_{\text{в}}=0,25$ Вт/(м·К) $\lambda_{\text{п}}=0,025$ Вт/(м·К) $\nu_{\text{в}}=17,5 \cdot 10^{-5}$ м²/с $\nu_{\text{п}}=17,5 \cdot 10^{-6}$ м²/с $\text{Pr}^{\text{п}}=0,73$; $\text{Pr}^{\text{в}}=0,83$.

№ 8

Плоске сталеве ребро має температуру $t_{\text{с2}}=80^{\circ}\text{C}$. Ширина ребра $b=40$ мм, товщина $\delta=2$ мм, а довжина $l=4$ м. Визначити теплоту, яка відводиться від ребра в навколишнє середовище з температурою 20°C з коефіцієнтом тепловіддачі $\alpha_{\text{п}}=10$ Вт/(м²·К), якщо теплопровідність матеріалу труб $\lambda=50$ Вт/(м·К).

№9

За умовою задачі № 37 визначити, до якої температури буде підігріватись повітря з початковою температурою 20°C в радіаторі, якщо температура води на вході в радіатор $t'_{\text{в}}=80^{\circ}\text{C}$, поверхня радіатора $F=22$ м², діаметр труб 14/10 мм/мм, теплопровідність труб $\lambda=45$ Вт/(м·К), коефіцієнти тепловіддачі 1,4 і 0,05 кВт/(м²·К) відповідно, міра оребрення радіатора $\beta=5$, температурний напір визначається як середньоарифметичний.

№10

В трубах повітряпідігрівника системи повітряного опалення з діаметром 42/38мм тече грійна вода з витратою 2448 т/год, температура якої змінюється від 150 до 85°C. Кількість труб – 500. В міжтрубному просторі зі швидкістю 7м/с рухається повітря, яке підігрівається від 14 до 21°C. Теплопровідність матеріалу труб $\lambda=55$ Вт/(м·К). Визначити потужність і необхідну поверхню підігрівника, якщо рух теплоносіїв протитоковий.

№11

Визначити поверхню нагріву водоводяного підігрівника типу в трубі. Грійна вода з витратою 2160кг/год і початковою температурою 145°C тече в кільцевому каналі, який утворений трубами з діаметрами 52/48 і 33/30мм. Нагрівана вода з витратою 3240кг/год підігрівається у внутрішній трубі від 18°C до 69°C. Втрати теплоти у зовнішнє середовище складають 5%, теплопровідність матеріалу труб $\lambda=50$ Вт/(м·К), рух води протитоковий.

№12

Грійна вода з витратою 4800 кг/год тече у кільцевому каналі протитокового водоводяного підігрівника типу труба в трубі, що утворений трубами з діаметром 86/80 і 58/52мм. Нагрівана вода з такою ж витратою підігрівається у внутрішній трубі від 35 до 75°C. Температура грійної води змінюється від 140 до 75°C. Теплопровідність матеріалу труб $\lambda=50$ Вт/(м·К), втрати теплоти 5%. Визначити довжину труби.

№13

Віконна рама складається з двох листів скла товщиною 4,0мм і прошарку повітря товщиною 40мм. Температура скла всередині приміщення 15°C, а зовні - 30°C. Визначити, як зміняться питомі теплові втрати, якщо збільшити товщину прошарку повітря до 45мм. Теплопровідність скла і повітря 0,7 і 0,022 Вт/(м·К) відповідно.

№14

Питомі теплові втрати через стінку будівлі складають 60 Вт/м². Стінка складається з цегли ($\delta=375$ мм, $\lambda=0,37$ Вт/(м·К)) і шару штукатурки ($\delta=15$ мм, $\lambda=0,09$ Вт/(м·К)). Визначити температуру на всіх гранях стінки, якщо температура стінки всередині приміщення становить 20°C.

№ 15

В автомайстерню планують провести опалення. Теплоізоляцію виконують з скловати. Якою має бути товщина теплоізоляції труб 100/94 мм/мм, щоб лінійні теплові втрати не перевищували 100 Вт/м. Температури зовнішньої стінки труби і зовнішнього повітря відповідно 80°C і -10°C. Теплопровідність скловати $\lambda=0,175$ Вт/(м·К).

13. Паливо та основи теорії горіння

Задача 1. Визначити нижчу теплоту згорання твердого робочого палива наступного складу: $C^p = 70,4\%$, $H^p = 5,1$, $O^p = 11,6$, $S^p = 2$, $N^p = 0,9$, $A^p = 5$, $W^p = 5\%$.

Рішення.

$$Q_n^p = 339O^p + 1030H^p - 109(O^p - S^p) - 25W^p = \\ = 70,4 + 1030 \cdot 5,1 - 109(11,6 - 2) - 25 \cdot 5 \approx 27900 \text{ кДж/кг.}$$

Задачі для самостійного рішення

№1

Визначити нижчу теплоту згорання твердого палива наступного складу: $W^p = 13\%$; $A^p = 21,8\%$; $S_k^p = 1,5\%$; $S_{op}^p = 1,5\%$; $C^p = 49,3\%$; $H^p = 3,6\%$; $N^p = 1\%$; $O^p = 8,6\%$.

№2

Визначити вищу теплоту згорання рідкого палива наступного складу: $W^p = 5\%$; $A^p = 4\%$; $S_k^p = 0,7\%$; $S_{op}^p = 0,8\%$; $C^p = 76,9\%$; $H^p = 4,2\%$; $N^p = 2\%$; $O^p = 6,4\%$.

№3

Визначити кількість повітря необхідного для рівномірного згорання сірки і водню.

№4

Визначити масу умовного палива, відповідну даному конкретному паливу, такого складу: $W^p = 10\%$; $A^p = 22,8\%$; $S_k^p = 1,5\%$; $S_{op}^p = 1,5\%$; $C^p = 49,3\%$; $H^p = 4,6\%$; $N^p = 2\%$; $O^p = 8,6\%$. Маса даного конкретного палива $V_k = 2 \text{ т}$.

14. Котельні установки, теплогенератори, водонагрівачі

Задачі для самостійного рішення

№1

Визначити ККД парового котла, якщо відомо: кількість використання теплоти $Q_1 = 236 \text{ кДж/м}^3$; фізичної теплоти $Q_{п} = 35 \text{ кДж/м}^3$; фізичної теплоти повітря $Q_{но} = 20 \text{ кДж/м}^3$; фізичної теплоти пари $Q_{дп} = 25 \text{ кДж/м}^3$; нижча теплота згорання палива $Q_n^p = 35900 \text{ кДж/м}^3$.

№2

Визначити ККД теплогенератора, якщо відомо: витрата палива $V = 3,1 \text{ м}^3/\text{с}$; нижча робоча теплота згорання палива $Q_n^* = 35,9 \text{ МДж}/\text{м}^3$; об'ємна витрата повітря $V = 4990 \text{ м}^3/\text{год.}$; температури на вході та виході з калориметра $t_1 = 8 \text{ }^\circ\text{C}$, $t_2 = 28 \text{ }^\circ\text{C}$; питома об'ємна теплоємність повітря $C' = 1,005 \text{ кДж}/(\text{м}^3 \text{ К})$.

№3

Визначити ККД водонагрівача, якщо відомо: витрата палива $V = 0,02 \text{ кг}/\text{с}$; фізична теплота згорання палива $Q_n = 27420 \text{ кДж}/\text{кг}$; нижча робоча теплота згорання палива $Q_n^* = 29,3 \text{ МДж}/\text{кг}$; витрата води $V = 2,5 \text{ кг}/\text{с}$; температура гарячої і холодної води $t_r = 90 \text{ }^\circ\text{C}$, $t_x = 16 \text{ }^\circ\text{C}$.

15. Теплопостачання

Задачі для самостійного рішення

№1

Споживачу гарячого водоспоживання відпущено $1,5 \text{ МВт}$ теплоти за добу. Температура гарячої води $75 \text{ }^\circ\text{C}$, а холодної $8 \text{ }^\circ\text{C}$. Яку кількість гарячої води відпущено споживачеві за цей період?

№2

Визначити опір у водопровідній трубі, якщо манометр показує тиск $0,8 \text{ МПа}$.

16. Сушіння с/г продукції

Задачі для самостійного рішення

№1

Визначити вологість загальної маси матеріалу $m_1 = 20 \text{ кг}$, і вологовміст матеріалу масою після сушки $m_2 = 12 \text{ кг}$, якщо маса абсолютно сухого матеріалу $M_c (m - m_b) = 8,3 \text{ кг}$.

ЛІТЕРАТУРА

1. Дідур В.А., Савченко О.Д., Журавель Д.П., Мовчан С.І. Гідравліка та її використання в агропромисловому комплексі. Підручник. – 2008. – 577 с.
2. Рогалевич І.П. Гідравліка: підручник. -К.: Вища школа, 1993.
3. Вакина В.В. Машиностроительная гидравлика. Примеры расчетов., М., "Машиностроение", 1985.
4. Башта Т.М. Гидравлика, гидромашины и гидроприводы. М., "Машиностроение", 1982.
5. Константинов Н.М. Гидравлика, гидрология, гидрометрия (в 2-х частях), Киев, 1990.
6. Штеренлихт Д.В. Гидравлика. М., Энергоиздат., 1984.
7. Исаев А.П. Гидравлика и гидромеханизация сельскохозяйственных процессов. Агропромиздат., 1990.
8. Б.Х. Драганов, О.С. Бесараб, А.А. Долінський, В.О. Лазаренко, А.В. Міщенко, О.В. Шелімонова (за ред. Б.Х. Драганова). Теплотехніка: Підручник. – 2-е вид., перероб. і доп. – Київ: Фірма "ІНКОС", 2005. – 400 с.
9. Н.М. Беляев. Термодинамика.– К.: Вища школа. 1987. –246с.
10. А.Н. Алабовский, С.М. Константинов, И.А. Недужий (под ред. С.М. Константинова). Теплотехника. – К.: Вища шк. Головное издат., 1986. – 225 с.
11. Захаров А.А. Применение теплоты в сельском хозяйстве. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Агропромиздат, 1986. – 288 с.

ДОДАТКИ

Додаток 1

Значення кінематичного коефіцієнту в'язкості води ν , $\text{см}^2/\text{сек}$ (стокси), в залежності від температури

t^0	ν	t^0	ν	t^0	ν
1	0,017321	12	0,012396	26	0,008774
2	0,016740	13	0,012067	28	0,008394
3	0,016193	14	0,011756	30	0,008032
4	0,015676	15	0,011463	35	0,007251
5	0,015188	16	0,011177	40	0,006587
6	0,014726	17	0,010888	45	0,006029
7	0,014289	18	0,010617	50	0,005558
8	0,013873	19	0,010356	55	0,0051147
9	0,013479	20	0,010105	60	0,004779
10	0,013101	22	0,009892		
11	0,012740	24	0,009186		

Додаток 2

Модулі витрат K , $\text{м}^3/\text{с}$, і питомі опори A , $\text{с}^2/\text{м}^6$, для найбільш вживаних діаметрів труб з різних матеріалів у квадратичній області опору

Умовний прохід D_y , мм	Матеріали труб				
	Ненові сталеві	Ненові чавунні	Азбесто-цементні тип 1, ВТ9	Пластмасові (ПВП тип СЛ)	Керамічні
50	<u>0,0095</u> 11080	–	–	<u>0,0176</u> 3228,3	<u>0,012</u> 6950
100	<u>0,076</u> 173,1	<u>0,0566</u> 312,1	<u>0,0729</u> 188,16	<u>0,076</u> 173,1	<u>0,035</u> 816,3
125	<u>0,114</u> 76,94	<u>0,102</u> 96,11	–	<u>0,143</u> 48,9	–
150	<u>0,18</u> 30,86	<u>0,164</u> 37,18	<u>0,178</u> 31,56	<u>0,202</u> 24,5	<u>0,214</u> 21,8
200	<u>0,379</u> 6,96	<u>0,351</u> 8,11	<u>0,356</u> 7,89	<u>0,493</u> 4,11	<u>0,456</u> 4,81
250	<u>0,676</u> 2,188	<u>0,629</u> 2,52	<u>0,67</u> 2,22	<u>0,874</u> 1,309	<u>0,82</u> 1,49
300	<u>1,085</u> 0,849	<u>1,026</u> 0,95	<u>1,048</u> 0,91	<u>1,188</u> 0,708	<u>1,32</u> 0,57
350	<u>1,637</u> 0,373	<u>1,539</u> 0,422	<u>1,525</u> 0,43	<u>1,624</u> 0,379	–
400	<u>2,319</u> 0,186	<u>2,174</u> 0,211	<u>2,147</u> 0,217	<u>2,219</u> 0,203	–
500	<u>4,117</u> 0,059	<u>3,898</u> 0,0658	<u>3,753</u> 0,071	<u>3,978</u> 0,0632	–

* В чисельнику наведені значення модулів витрати K

Додаток 3

Значення поправочних коефіцієнтів β в залежності від середньої швидкості руху v , м/с, для труб різного діаметра і з різних матеріалів.

v , м/с	Матеріали труб					
	Нові сталеві	Нові чавунні	Неніві сталеві і чавунні	Азбесто-цементні і залізо-бетонні	Пластмасові та скляні	Керамічні
0,2	1,244	1,462	1,41	1,308	1,439	1,55
0,4	1,113	1,226	1,20	1,158	1,23	1,20
0,6	1,057	1,115	1,115	1,082	1,123	1,09
0,8	1,021	1,047	1,06	1,034	1,052	1,034
1,0	1,0	1,0	1,03	1,0	1,0	1,0
1,2	0,986	0,965	1,0	0,974	0,96	0,977
1,4	0,972	0,938	1,0	0,953	0,926	0,961
1,8	0,958	0,899	1,0	0,922	0,876	0,91
2,2	0,946	0,871	1,0	0,900	0,837	0,926
2,6	0,937	0,851	1,0	0,883	0,806	0,916
3,0	0,932	0,836	1,0	0,870	0,780	0,910

Додаток 4

Значення витратних характеристик K для квадратичної області опору

d , мм	Труби нормальні			Труби нові сталеві та чавунні		
	K л/сек	$K^2/1000$	$1000/K^2$	K л/сек	$K^2/1000$	$1000/K^2$
50	8,313	0,0691	14,472	10,10	0,1020	9,804
75	24,77	0,6136	1,6297	29,70	0,8821	1,1337
100	53,61	2,874	0,34795	63,73	4,061	0,24624
125	97,39	9,485	0,10543	115,1	13,248	0,07548
150	158,4	25,091	0,03985	186,3	34,708	0,02881
200	340,8	116,15	0,00861	398,0	158,40	0,00631
250	616,4	379,9	0,00263	716,3	513,09	0,00195
300	999,3	998,6	0,00100	1157	1339	$0,747 \cdot 10^{-3}$
350	1503	2259	$0,443 \cdot 10^{-3}$	1735	3007	$0,333 \cdot 10^{-3}$
400	2140	4580	$0,218 \cdot 10^{-3}$	2463	6066	$0,165 \cdot 10^{-3}$
450	2920	8526	$0,117 \cdot 10^{-3}$	3354	11249	$0,889 \cdot 10^{-3}$
500	3857	14876	$0,672 \cdot 10^{-4}$	4424	19563	$0,511 \cdot 10^{-4}$
600	6239	38925	$0,257 \cdot 10^{-4}$	7131	50851	$0,197 \cdot 10^{-4}$
700	9362	87647	$0,114 \cdot 10^{-4}$	10674	113934	$0,878 \cdot 10^{-5}$
800	13301	176917	$0,565 \cdot 10^{-5}$	15132	228977	$0,437 \cdot 10^{-5}$
900	18129	328661	$0,304 \cdot 10^{-5}$	20587	423825	$0,236 \cdot 10^{-5}$
1000	23911	571736	$0,175 \cdot 10^{-5}$	27111	735006	$0,136 \cdot 10^{-5}$
1100	30709	943043	$0,106 \cdot 10^{-5}$	34769	1208888	$0,827 \cdot 10^{-6}$
1200	38601	1490037	$0,671 \cdot 10^{-6}$	43650	1905323	$0,525 \cdot 10^{-6}$

Значення поправочних коефіцієнтів θ_1 та θ_2 для розрахунків труб в перехідній області опору

Труби	Коеф.	Швидкість V , м/сек														
		0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	2,5	3,0
Нормальні	θ_1	0,84	0,88	0,92	0,94	0,95	0,96	0,97	0,98	0,99	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	θ_2	1,42	1,29	1,19	1,14	1,11	1,08	1,06	1,04	1,03	1,02	1,01	1,01	1,00	1,00	1,00
Нові сталеві та чавунні	θ_1	0,86	0,89	0,91	0,92	0,93	0,94	0,95	0,95	0,96	0,97	0,97	0,98	0,98	0,99	0,99
	θ_2	1,35	1,26	1,22	1,18	1,16	1,15	1,14	1,13	1,12	1,11	1,10	1,10	1,09	1,09	1,08

Значення модулів пружності для деяких матеріалів

Матеріал	Модуль пружності		Відношення модулів пружності води і матеріала труб
	Па	кН/м ²	
Вода	$2,07 \cdot 10^9$	$2,034 \cdot 10^6$	1
Нафта, мінеральне масло	$1,35 \cdot 10^9$	$1,324 \cdot 10^6$	—
Гас	$1,4 \cdot 10^9$	$1,37 \cdot 10^6$	—
Ртуть	$3,3 \cdot 10^{10}$	$3,24 \cdot 10^7$	—
Свинцеві труби	$5 \cdot 10^9 - 2 \cdot 10^8$	$4,9 \cdot 10^6 - 1,96 \cdot 10^5$	0,4 – 10,0
Дерев'яні труби	$1 \cdot 10^9$	$9,81 \cdot 10^6$	0,2
Бетонні труби	$2 \cdot 10^9$	$19,62 \cdot 10^6$	0,1
Чавунні труби	$1 \cdot 10^{11}$	$9,81 \cdot 10^7$	0,02
Сталеві труби	$2 \cdot 10^{11}$	$196 \cdot 10^6$	0,01

Теплофізичні властивості сухого повітря і води

t, °C	<i>Повітря</i>			<i>Вода</i>		
	$\mu \cdot 10^6, \text{Н} \cdot \text{с} / \text{м}^2$	$\nu \cdot 10^6, \text{м}^2 / \text{с}$	Pr	$\lambda, \text{Вт} / (\text{м} \cdot \text{К})$	$\nu \cdot 10^6, \text{м}^2 / \text{с}$	Pr
-10	16,7	12,43	0,712	-	-	-
0	17,2	13,28	0,707	0,551	1,789	13,67
10	17,6	14,16	0,706	0,574	1,306	9,58
20	18,1	15,06	0,703	0,600	1,006	7,02
30	18,6	16,0	0,701	0,617	0,805	5,42
40	19,1	16,96	0,699	0,634	0,659	4,31
50	19,6	17,95	0,698	0,648	0,566	3,54
60	20,1	18,97	0,696	0,659	0,476	2,96
70	20,6	20,02	0,694	0,667	0,415	2,55
80	21,1	21,09	0,692	0,674	0,365	2,21
90	21,5	22,1	0,690	0,680	0,326	1,95
100	21,9	23,1	0,688	0,682	0,292	1,75
120	22,8	25,5	0,686	0,685	0,252	1,47

Фізичні властивості деяких матеріалів

Матеріал	t, °C	$\rho, \text{кг} / \text{м}^3$	$\lambda, \text{Вт} / (\text{м} \cdot \text{К})$
Мідь	0-20	8000	384
Алюміній	0-20	2670	204
Азбест волокно	50	770	0,116
Пісок	50	1500	0,326
Слюда	0-20	290	0,58

Теплофізичні властивості сухого повітря при нормальному
атмосферному тискові ($\mu=28,97$ кг/кмоль)

$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$C_p,$ кДж/(кг·К)	$\nu \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$	$k=C_p/C_v$	$\lambda \cdot 10^2,$ Вт/(м·К)
-30	1,453	1,013	10,80	1,403	2,20
-20	1,395	1,009	11,79	1,402	2,28
-10	1,342	1,009	12,43	1,402	2,36
0	1,293	1,005	13,28	1,401	2,44
10	1,247	1,005	14,16	1,401	2,51
20	1,205	1,005	15,06	1,401	2,59
30	1,165	1,005	16,00	1,401	2,67
40	1,128	1,005	16,96	1,401	2,76
50	1,093	1,005	17,95	1,399	2,83
60	1,060	1,005	18,97	1,399	2,90
70	1,029	1,009	20,00	1,397	2,97
80	1,000	1,009	21,09	1,397	3,05
90	0,972	1,009	22,10	1,397	3,13
100	0,946	1,009	23,13	1,397	3,21
120	0,898	1,009	25,45	1,396	3,44
140	0,854	1,013	27,80	1,393	3,49
160	0,815	1,017	30,10	1,390	3,64
180	0,779	1,022	32,49	1,387	3,78
200	0,776	1,026	34,85	1,386	3,93
250	0,674	1,038	40,60	1,384	4,27
300	0,615	1,047	48,33	1,379	4,61
350	0,566	1,059	55,46	1,373	4,91
400	0,524	1,068	63,09	1,368	5,21
500	0,456	1,093	79,38	1,357	5,74
600	0,404	1,114	96,89	1,347	6,22
700	0,362	1,135	115,4	1,338	6,71
800	0,329	1,156	134,8	1,331	7,18

Термодинамічні властивості води і водяного пару
в стані насичення (за тиском)

P·10, кПа	t, °C	$\nu' \cdot 10^3,$ м³/кг	$\nu'',$ м³/кг	$\rho'' \cdot 10,$ кг/м³	h', кДж/ кг	h'', кДж/ кг	г, кДж/ кг	s', кДж/ кг·К	s'', кДж/ кг·К
0,10	6,92	1,0001	129,9	0,0770	29,320	2513	2484	0,1054	8,875
0,15	13,03	1,0007	87,90	0,1138	54,750	2525	2470	0,1958	8,827
0,20	17,51	1,0014	66,97	0,1493	73,520	2533	2459	0,2609	8,722
0,25	21,09	1,0021	54,24	0,1843	88,500	2539	2451	0,3124	8,642
0,30	24,09	1,0028	45,66	0,2190	101,04	2545	2444	0,3546	8,576
0,35	26,69	1,0035	39,48	0,2533	110,86	2550	2438	0,3908	8,521
0,40	28,97	1,0041	34,81	0,2873	121,42	2554	2433	0,4225	8,473
0,50	32,88	1,0053	28,19	0,3547	137,83	2561	2423	0,4761	8,393
0,60	36,18	1,0064	23,74	0,4212	151,50	2567	2415	0,5207	8,328
0,70	39,03	1,0075	20,53	0,4871	163,43	2572	2409	0,5591	8,274
0,80	41,54	1,0085	18,10	0,5525	173,9	2576	2402	0,5927	8,227
0,90	43,79	1,0094	16,20	0,6172	183,3	2580	2397	0,6225	8,186
1,0	45,84	1,0103	14,68	0,6812	191,9	2584	2392	0,6492	8,149
1,2	49,45	1,0119	12,35	0,8097	207,0	2591	2384	0,6966	8,085
1,4	52,58	1,0133	10,69	0,9354	220,1	2596	2376	0,7368	8,031
1,6	55,34	1,0147	9,429	1,060	231,7	2601	2369	0,7722	7,984
1,8	57,82	1,0159	8,444	1,185	241,9	2605	2363	0,8038	7,944
2,0	60,08	1,0171	7,647	1,308	251,4	2609	2358	0,8321	7,907
2,5	64,99	1,0199	6,202	1,612	272,0	2618	2346	0,8934	7,830
3,0	69,12	1,0222	5,226	1,913	289,3	2625	2336	0,9441	7,769
4,0	75,88	1,0264	3,994	2,504	317,7	2636	2318	1,0261	7,670
5,0	81,35	1,0299	3,239	3,087	340,6	2645	2304	1,0910	7,593
6,0	85,95	1,0330	2,732	3,661	360,0	2653	2293	1,1453	7,531
7,0	89,97	1,0359	2,364	4,230	376,8	2660	2283	1,1918	7,479
8,0	93,52	1,0385	2,087	4,792	391,8	2665	2273	1,2330	7,434
9,0	96,72	1,0409	1,869	5,350	405,3	2670	2265	1,2696	7,394
10,0	99,64	1,0432	1,694	5,903	418,4	2675	2258	1,3026	7,360
12,0	104,81	1,0472	1,429	6,999	439,4	2683	2244	1,3606	7,295
14,0	109,33	1,0510	1,236	8,088	458,5	2690	2232	1,4109	7,246
16,0	113,32	1,0543	1,091	9,164	475,4	2696	2221	1,4550	7,202
18,0	116,94	1,0575	0,9773	10,23	490,7	2702	2211	1,4943	7,163
20,0	120,23	1,0605	0,8854	11,29	504,8	2707	2202	1,5302	7,127
22,0	123,27	1,0633	0,8098	12,35	517,8	2711	2193	1,5630	7,096
24,0	126,09	1,0659	0,7465	13,40	529,8	2715	2185	1,5929	7,067
26,0	128,73	1,0685	0,6925	14,44	540,9	2719	2178	1,621	7,040

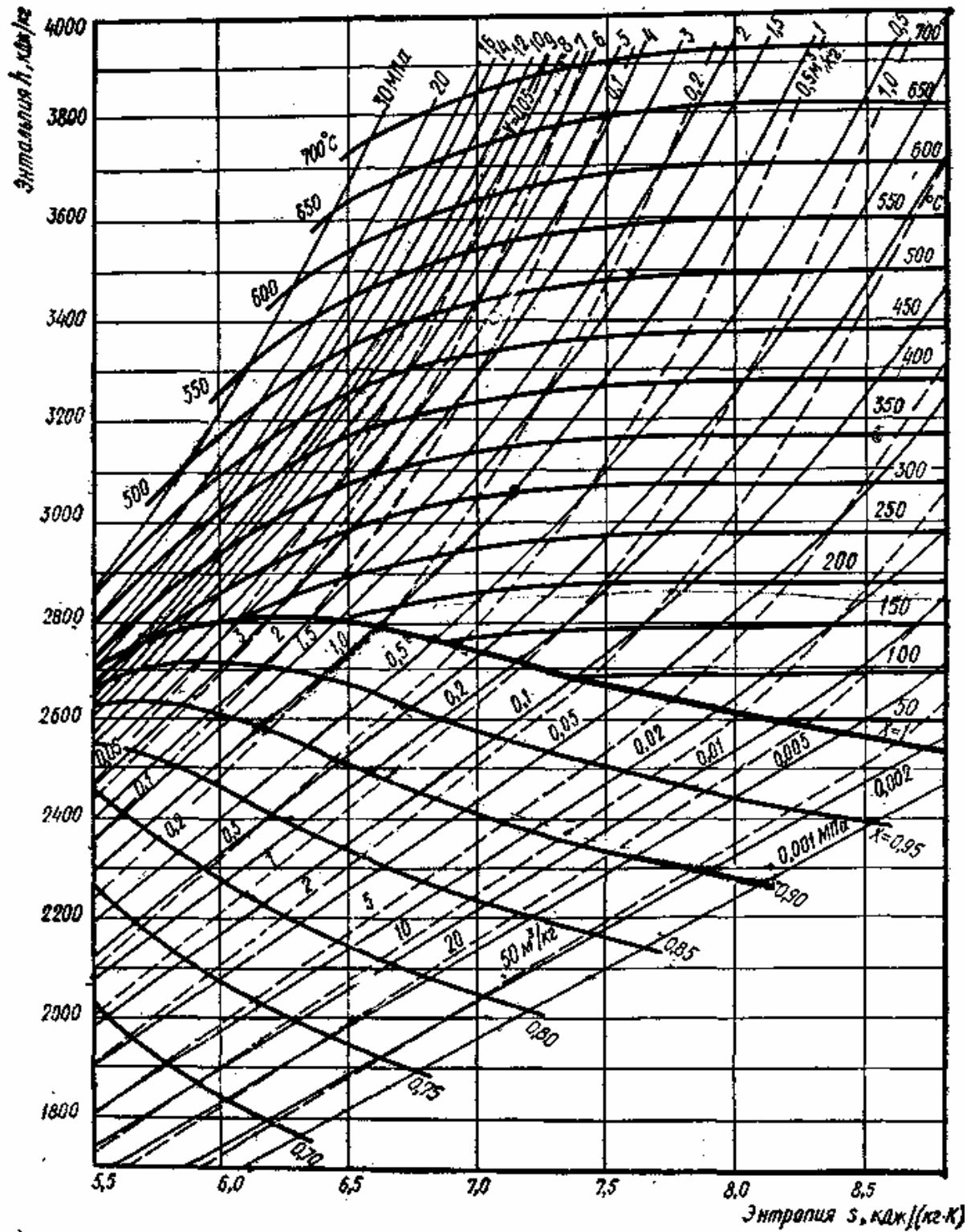
P·10, кПа	t, °C	$\nu' \cdot 10^3,$ м³/кг	$\nu'',$ м³/кг	$\rho'' \cdot 10,$ кг/м³	h', кДж/ кг	h'', кДж/ кг	г, кДж/ кг	s', кДж/ кг·К	s'', кДж/ кг·К
28,0	131,20	1,0709	0,6461	15,48	551,4	2722	2171	1,647	7,015
30,0	133,54	1,0733	0,6057	16,51	561,4	2725	2164	1,672	6,992
35,0	138,88	1,0836	0,5241	19,80	584,5	2738	2133	1,777	6,941
40,0	143,62	1,0876	0,4624	21,63	604,7	2732	2148	1,728	6,897
45,0	147,92	1,0883	0,4139	24,16	623,4	2744	2121	1,821	6,857
50,0	151,84	1,0927	0,3747	26,69	640,1	2749	2109	1,860	6,822
60,0	158,84	1,1007	0,3156	31,69	670,5	2757	2086	1,931	6,761
70,0	164,96	1,1081	0,2728	36,66	697,2	2764	2067	1,992	6,709
80,0	170,42	1,1149	0,2403	41,61	720,9	2769	2048	2,046	6,663
90,0	175,35	1,1213	0,2149	46,54	742,8	2774	2031	2,094	6,623
100	179,88	1,1273	0,1946	51,39	762,7	2778	2015	2,138	6,587
110	184,05	1,1331	0,1775	56,34	781,1	2781	2000	1,179	6,554
120	187,95	1,1385	0,1633	61,24	798,3	2785	1987	1,216	6,523
130	191,60	1,1438	0,1512	66,14	814,5	2787	1973	2,251	6,495
140	195,04	1,1490	0,1408	71,03	830,0	2790	1960	2,284	6,469
150	198,28	1,1539	0,1317	75,93	844,6	2792	1947	2,314	6,445
160	201,36	1,1586	0,1238	80,80	858,3	2793	1935	2,344	6,422
170	204,30	1,1632	0,1167	85,69	871,6	2795	1923	2,371	6,400
180	207,10	1,1678	0,1104	90,58	884,4	2796	1912	2,397	6,379
190	209,78	1,1722	0,1047	95,49	896,6	2798	1901	2,422	6,359
200	212,37	1,1766	0,0996	100,41	908,5	2799	1891	2,447	6,340
220	217,24	1,1851	0,0907	110,30	930,9	2801	1870	2,492	6,305

Термо-е.р.с. стандартизованих термопар

Термо пара $t, ^\circ\text{C}$	Термо – е. р. с. , мВ								
	МКн (Т)	ЖКн (J)	ХК (E)	ХА (K)	ВР 5/20 (C)	ВР 10/ 20	ПР 10/0 (S)	ПР 13/0 (R)	ПР 30/6 (B)
100	4,28	5,27	6,898	4,095	1,33	1,00	0,645	0,647	0,033
200	9,28	10,77	14,57	8,137	2,87	2,10	1,440	1,468	0,178
300	14,86	16,32	22,88	12,207	4,52	3,20	2,323	2,400	0,431
400	20,87	21,84	31,48	16,395	6,21	4,30	3,260	3,407	0,786
500		27,39	40,27	20,640	7,91	5,40	4,234	4,471	0,241
600		33,09	49,09	24,902	9,6	6,50	5,237	5,582	1,791
700		39,13	57,82	29,128	11,27	7,60	6,274	6,741	2,430
800		45,50	66,42	33,277	12,93	8,65	7,345	7,949	3,154
900		51,87		37,325	14,56	9,70	8,448	9,203	3,957
1000		57,94		41,269	16,14	10,70	9,585	10,503	4,833
1100		63,78		45,108	17,67	11,70	10,754	11,846	5,777
1200		69,54		48,828	19,15	12,65	11,947	13,224	6,783
1300				52,398	20,58	13,60	13,155	14,624	7,845
1400					21,96	14,50	14,368	16,035	8,952
1500					23,30	15,35	15,576	17,445	10,094
1600					24,59	16,15	16,771	18,842	11,257
1700					25,82	16,90	17,942	20,215	12,426
1800					27,0	17,60			13,585
2000					29,18	18,90			
2200					31,14	20,15			
2400					32,86	21,30			
2500					33,64	21,85			

Температура холодних спаїв для 0 $^\circ\text{C}$

HS – діаграма водяної пари



Олег Вікторович Нахайчук

Василь Іванович Музичук

ЗАДАЧНИК З ГІДРАВЛІКИ ТА ТЕПЛОТЕХНІКИ

Навчальний посібник

Підписано до друку . Формат 148×210мм А5. Папір офсетний.
Гарнітура Peterburg. Ум. Друк. Арк. 5.3. Наклад 300 екз. Зам.

*Вінницький національний аграрний університет
м. Вінниця, вул. Сонячна, 3, 21008*

