

Міністерство освіти і науки України
Кіровоградський національний технічний університет

Факультет автоматики та енергетики
Кафедра електротехнічних систем та енергетичного менеджменту

Гідрогазодинаміка

Методичні вказівки до виконання практичних занять для студентів
спеціальності 6.05070108 „Енергетичний менеджмент”

Кіровоград 2016

Міністерство освіти і науки України
Кіровоградський національний технічний університет

Факультет автоматики та енергетики
Кафедра електротехнічних систем та енергетичного менеджменту

Гідрогазодинаміка

Методичні вказівки до виконання практичних занять для студентів
спеціальності 6.05070108 «Енергетичний менеджмент»

„Ухвалено”
на засіданні кафедри
„Електротехнічні системи та
енергетичний менеджмент”
Протокол № 10 від „ 10 „ 03 2016 р.

Кіровоград 2016

Методичні вказівки до виконання практичних занять з курсу „Гідрогазодинаміка”.
Практикум та методичні вказівки до самостійної роботи студентів спеціальності
6.05070108 „Енергетичний менеджмент”/ Укл. Кравченко В.І., Ковальчук Н.В. –
Кіровоград: КНТУ, 2016, 49 с. – укр. мовою.

Укладачі: канд. техн. наук, доцент Кравченко В.І., викл. Ковальчук Н.В.

Рецензент: доктор технічних наук, професор Клименко В.В.

ЗАГАЛЬНІ МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО ПРАКТИЧНИХ ЗАНЯТЬ

Методичні вказівки і контрольні завдання призначені для проведення практичних занять з курсу „Гідрогазодинаміка”.

Практичні заняття є важливою ланкою в підготовці студентів до самостійної інженерної діяльності. Для того, щоб практичні заняття досягли мети, студенти повинні завчасно і систематично готуватися до занять; проявляти самостійність при рішенні задач; розуміти результати їх рішення.

При підготовці до практичних занять кожен студент повинен вивчити теоретичний матеріал за вказаною темою. При цьому необхідно не тільки усвідомити і зрозуміти матеріал, але й самостійно довести всі положення теорії. Крім того, потрібно виділити прикладні питання теорії, які можуть бути потрібні при рішенні задач. Самостійні доведення і висновки є гарним тренуванням і першим кроком до самостійного рішення задач.

Важливо також провести порівняльний аналіз різних методик рішення або різних формул, що використовуються для визначення деяких величин, і чітко з'ясувати області їх застосування.

При вивченні нового матеріалу доцільно записувати всі питання, які залишаються незрозумілими. Постановлення і запис питань сприяє розвитку мислення і формування навичок грамотного викладення своїх думок.

При розв'язанні будь-якої задачі з гідрогазодинаміки можна виділити наступні основні етапи:

- розуміння задачі;
- розв'язання задачі в загальному вигляді;
- одержання числового результату;
- аналіз рішення.

Прочитавши задачу, необхідно її зрозуміти, тобто проаналізувати. Для цього потрібно:

- зобразити гідравлічну схему або пристрій, який потрібно обчислити. Якщо схема задана, то її потрібно накреслити, позначивши усі параметри, які входять в умову задачі;
- розібратися у призначенні і взаємодії усіх елементів накресленої схеми;
- дати визначення усіх величин, що входять в умови задачі і в першу чергу тієї величини, котру потрібно знайти;
- якщо у вказані визначення входять нові величини, котрі не задані в умові задачі, їх потрібно позначити на схемі. Кожній новій величині дати визначення;
- для цього потрібно установити, яким теоретичним законам або правилам підкорюються величини, які розглянути в аналізі задачі. При

цьому велику допомогу може надати перелік формул, котрі були записані в зошит при самостійному опануванні теоретичного матеріалу;

- використовуючи вказані визначення і закони, корисно записати ряд величин, починаючи з невідомої і закінчуючи заданими. Між ними повинні бути в логічній послідовності розташовані усі величини, котрі забезпечують логічний перехід від невідомих к заданим величинам;

- закінчуючи аналіз задачі, необхідно виявити в ній ті чи інші обмеження, котрі пред'являються як до величин, що задані в тексті, так до нових величин, що одержані при попередньому аналізі задачі. Кожні обмеження потрібно записати у вигляді відповідного математичного співвідношення;

- закінчивши аналіз задачі, переходять до пошуку алгоритму розв'язання задачі. Цей пошук зводиться до складання ланцюга розрахункових співвідношень, який дозволить визначити невідомі величини через послідовний ряд заданих і додаткових величин, або до складання системи рівнянь, в яку входять вказані величини.

На рис 1. показана структура процесу розв'язання задачі



Рисунок 1 – Схема структури процесу розв'язання задачі

В обох випадках потрібно оцінити раціональність рішення в загальному вигляді шляхом знаходження невідомих величин у вигляді розрахункових формул. Іноді вигідніше без виводу розрахункових формул одразу перейти к чисельному розв'язанню одержаної системи рівнянь або к поетапному чисельному визначенню усіх величин, котрі входять в послідовний ряд розрахункових співвідношень.

При розв'язанні задачі в загальному вигляді можна здійснити частинну перевірку правильності рішення. Рішення неправильне, якщо не співпадають розмірності окремих складових. При одержанні чисельної відповіді потрібно звернути увагу на вибір одиниць вимірювання і потрібну точність розрахунку тієї чи іншої величини. Не має сенсу, наприклад, обчислювати опір трубопроводу з вісьма значущими цифрами, якщо розміри самої труби визначені з точністю $\pm 0,5\%$, коефіцієнт гідравлічного тертя – з точністю 3...5%, прискорення вільного падіння – з точністю 0,5%.

Розв'язання задачі потрібно закінчити аналізом одержаного рішення. Такий аналіз включає в себе перевірку правильності рішення, відповідність одержаного рішення теоретичним положенням. Корисно встановити - чи є інший, більш раціональний спосіб розв'язання і т. і.

Необхідно звернути увагу на порядок одержаних величин, оцінити точність рішення.

1. ФІЗИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ РІДИН

Рідина – фізичне тіло, що має текучість, здатність змінювати свою форму під дією незначних сил. Основними характеристиками рідин є густина, стисливість, теплове розширення, в'язкість.

1. Густина однорідної рідини – це відношення її маси m до займаного об'єму V :

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

Одиниця густини в СІ – кг/м^3 . Значення густин деяких рідин наведені у додатку 1.

2. Стисливість – властивість рідини змінювати свій об'єм під дією тиску. Вона враховується коефіцієнтом об'ємного стиску β_p , що являє собою відносну зміну об'єму рідини, на одиницю тиску:

$$\beta_p = -\frac{\Delta V}{V_0} \frac{1}{\Delta p},$$

де ΔV – зменшення об'єму при збільшенні тиску на Δp , V_0 – початковий об'єм рідини. Одиниця вимірювання β_p – Па^{-1} . Коефіцієнт об'ємного стиснення β_p зв'язаний з об'ємним модулем пружності E співвідношенням

$$\beta_p = \frac{1}{E}.$$

Значення коефіцієнта об'ємного стиснення β_p для деяких рідин наведені у додатку 1.

3. Теплове розширення рідини характеризується температурним коефіцієнтом об'ємного розширення, що являє собою відносну зміну об'єму рідини при зміні температури на 1°C :

$$\beta_t = \frac{\Delta V}{V_0} \frac{1}{\Delta t},$$

де Δt – зміна температури рідини. Значення температурного коефіцієнта об'ємного розширення ($^\circ\text{C}^{-1}$) для деяких рідин наведені у додатку 1.

4. Вязкість – це властивість рідини чинити опір деформації зсуву. Вона проявляється при русі рідини. Сила тертя між шарами рідини

$$\Delta F = \mu \left| \frac{du}{dy} \right| \Delta S,$$

де μ – коефіцієнт пропорційності, що називається динамічною в'язкістю, du – приріст швидкості, що відповідає приросту координати dy (рис. 1.1), ΔS – площа поверхні стикання шарів.

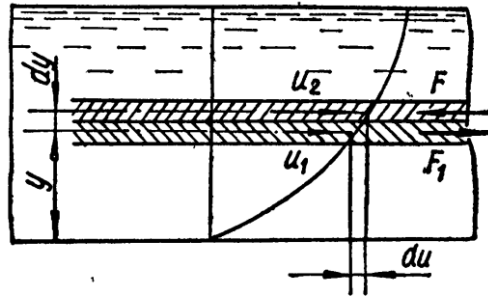


Рисунок 1.1 – Відносний рух шарів рідини

Дотична напруга в рідині

$$\tau = \lim_{\Delta s \rightarrow 0} \frac{\Delta F}{\Delta S} = \mu \left| \frac{du}{dy} \right|.$$

В СІ динамічна в'язкість вимірюється в паскаль-секундах (Па·с).

Поряд з динамічною в'язкістю вводиться поняття кінематичної в'язкості:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}.$$

Вона вимірюється у м²/с, або у мм²/с. Значення кінематичної в'язкості для деяких рідин наведені у додатках А, Б, В.

Задача 1. 5 літрів рідини важать 41,7 Н. Визначити її питому вагу і густину (питому масу).

Задача 2. Визначити об'ємну вагу повітря при надлишковому тиску 500 кгс/м² і температурі 200 °С.

Задача 3. Визначити підвищення тиску, при якому початковий об'єм води зменшиться на 1,5 %.

Задача 4. Визначити підвищення тиску, під яким початковий об'єм води зменшиться на 1,0 %. (0,1; 0,2; 0,3; 0,5... варіанти)

Задача 5. На скільки зменшиться і чому буде дорівнювати кінцевий об'єм води з початковою ємністю 2 м³, при збільшенні тиску на $\Delta P = 200$ кгс/см².

Задача 6. Визначити температурний коефіцієнт об'ємного (температурного) розширення води β_t , якщо при збільшенні температури з 10 до 20 °С об'єм з 800 літрів збільшився на 6 літрів.

Задача 7. Для періодичного акумулювання приросту води, що одержується при зміні температури в системах центрального водяного опалення влаштовують розширювальні резервуари, які приєднуються в системі у верхній її точці і з'єднуються з атмосферою. Визначити найменший об'єм розширювального резервуару, щоб він повністю не випорожнювався. Допустиме коливання температури води під час перерв в топці $\Delta t = 95 - 70 = 25$ °С. Об'єм води в системі $0,55$ м³, коефіцієнт температурного розширення води β_t при $t = 80$ °С становить $0,0006$ 1/°С.

Задача 8. В опалювальний котел надходить 50 м³ води при температурі 70 °С. Який об'єм води буде виходити з котла, якщо нагрів відбувається до кінцевої температури 90 °С, а коефіцієнт температурного розширення $\beta_t = 0,00064$ 1/°С.

Задача 9. Зазор між двома пластинами, з яких одна нерухома, а друга пересувається зі швидкістю 2 см/с, заповнений рідиною. Напруження тертя на поверхні пластини $\tau = 0,04$ Па. Визначити динамічну в'язкість рідини при висоті зазору в 1 мм.

Питання для контролю знань

1. Як визначають густину і питому вагу однорідної рідини? Який зв'язок існує між густиною і питомою вагою?

2. Що називають питомим об'ємом? В яких випадках використовують це поняття?

3. Який зв'язок існує між густиною, температурою і тиском для ідеальних газів?

4. Що називають числом Маха? За яких значень числа Маха можна не враховувати стисливість повітря?

5. Що називають швидкістю звуку? Як визначають цю величину для краплинних рідин і для газів у випадку адіабатної течії?

6. Що називають стисливістю рідин? Якими коефіцієнтами характеризується стисливість? Зв'язок між ними.

7. Чим характеризується температурне розширення рідин?

8. Що називають в'язкістю рідин і газів?

9. Запишіть закон Ньютона –Петрова.

10. Якими коефіцієнтами характеризується в'язкість? Розмірність цих коефіцієнтів в системах одиниць вимірювання СГС, СІ.

2. ОСНОВНЕ РІВНЯННЯ ГІДРОСТАТИКИ

Гідростатичним тиском в точці називається напруга стиснення в ній, що дорівнює

$$p = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{\Delta P}{\Delta S},$$

де ΔS – елементарна площадка, що містить дану точку; ΔP – нормальна стислива сила, що діє на цю площадку.

Гідростатичний тиск направлений по нормалі до площадки, в даній точці по всім напрямкам однаково, залежить від положення точки у рідині, яка знаходиться у спокої.

Одиницею тиску в СІ є паскаль (Па).

Рівновага рідини описується диференціальним рівнянням Ейлера, в результаті перетворень яких може бути одержано основне рівняння рівноваги у диференціальній формі:

$$dp = \rho(Xdx + Ydy + Zdz), \quad (2.1)$$

де dp – повний диференціал тиску; X, Y, Z – проекції прискорення масових сил на координатні осі; dx, dy, dz – приріст координат.

Якщо на рідину діє тільки сила ваги і вісь направлена вертикально вгору, то $X = 0, Y = 0, Z = -g$, і після інтегрування рівняння (2.1) одержимо основне рівняння гідростатики:

$$\frac{p}{\rho g} + z = \text{const},$$

де p – тиск в точці, розташованій на висоті z від горизонтальної площини порівняння $O-O$ (рис. 2.1).

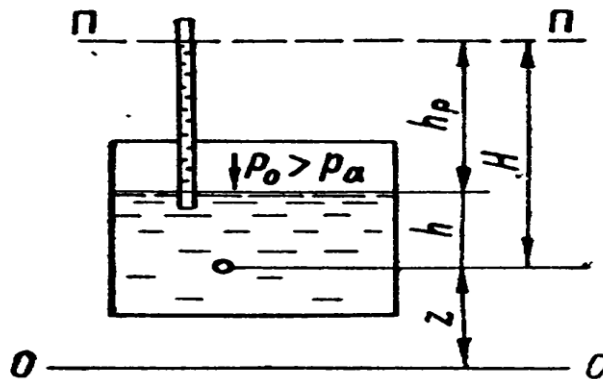


Рисунок 2.1.

Повний (абсолютний) гідростатичний тиск у будь-якій точці рідини

$$p = p_0 + \rho gh,$$

де p_0 – тиск на вільній поверхні, ρgh – вага стовпа рідини висотою h з площею поперечного перерізу, рівній одиниці (h – глибина занурення точки).

Поверхні рівня (поверхні рівного тиску) у даному випадку є горизонтальні площі. З рівняння (2.1) при $p = \text{const}$, $dp = 0$, $X = 0$, $Y = 0$, $Z = -g$ одержимо

$$z = \text{const}.$$

Надлишковим або манометричним тиском називається різниця між абсолютним і атмосферним тиском p_a :

$$p_{\text{над}} = p - p_a.$$

Вакуум (розрідження) – це недолік тиску до атмосферного

$$p_{\text{вак}} = p_a - p.$$

Величини

$$h_p = \frac{p_{\text{над}}}{\rho g} = \frac{p - p_a}{\rho g}$$

$$\text{та } h_{\text{вак}} = \frac{p_{\text{вак}}}{\rho g} = \frac{p_a - p}{\rho g}$$

називаються відповідно п'єзометричною і вакууметричною висотами.

Площина $\Pi-\Pi$, у всіх точках якої тиск дорівнює атмосферному, називається п'єзометричною площиною. Якщо посудина відкрита, то п'єзометрична площина співпадає з вільною поверхнею рідини. Для закритої посудини п'єзометрична площина може розташовуватися і вище вільної поверхні рідини (при $p_0 > p_a$) і нижче неї (при $p_0 < p_a$). Надлишковий тиск у будь-якій точці рідини

$$p_{\text{над}} = \rho g H,$$

де H – глибина занурення точки під п'єзометричною площиною.

Задача 1. Визначити абсолютний (повний) гідростатичний і надлишковий тиск на дні ємності з водою, глибина якого 1,2 м, якщо над водою тиск атмосферний.

Задача 2. Визначити повний гідростатичний тиск і вакуум в точці, розташованій на глибині 0,5 м в ємності з густиною $\rho = 800 \text{ кг/м}^3$. Тиск на вільній поверхні рідини складає $P_0 = 0,9 P_{at}$.

Задача 3. Визначити всі види гідростатичного тиску в ємності з рідиною на глибині 3 м, при тиску на вільну поверхню рідини $2 \cdot 10^5 \text{ Па}$. Густина рідини складає $0,9 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$.

Задача 4. До вільної поверхні площею 10 см^2 ємності з водою глибиною 50 см прикладена поршнем сила 50 Н. Визначити гідростатичний тиск на всю площу дна ємності 100 см^2 .

Задача 5. Визначити глибину води h_1 в ємності, що сполучається з ємністю з рідиною, густина якої $\rho_2 = 860 \text{ кг/м}^3$ і її глибина над площею розділу $h_2 = 0,73 \text{ м}$.

Задача 6. Визначити вакуум P_v у верхній частині ємності з водою в точці 3, якщо у правому коліні U-подібної трубки знаходиться масло, з густиною $\rho_m = 850 \text{ кг/м}^3$. Висота стовпів рідин: $h_1 = 0,342 \text{ м}$; $h_2 = 0,8 \text{ м}$.

Задача 7. Визначте тиск на дні океану, якщо $H = 9 \text{ км}$, $\rho = 1,03 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$.

Вважати морську воду нестисливою. Як зміниться густина води, якщо врахувати стисливість. Прийняти $K = 2030 \text{ МПа}$.

Задача 8. Визначити тиск рідини на дно циліндра (рис. 2.2), якщо зусилля на штоку циліндра $F = 10 \text{ кН}$, діаметр циліндра $D = 100 \text{ мм}$, висота циліндра $h = 250 \text{ мм}$, густина рідини $\rho = 900 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$. Яку частку у відсотках складає ваговий тиск від поверхневого тиску?

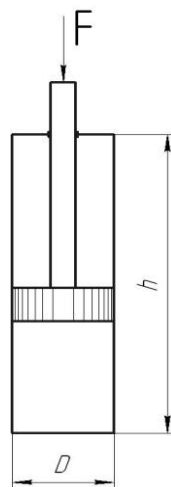


Рисунок 2.2

Задача 9. Визначте силу тиску на дно конічного резервуара, заповненого водою, якщо діаметр основи конуса $D = 1,5 \text{ м}$, $\rho = 1 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$, висота конуса $H = 2 \text{ м}$. Як зміниться тиск, якщо конус замінити циліндром такого ж діаметру і висоти?

Задача 10. Визначте силу F , котра діє на шток поршня (рис. 2.3), якщо діаметр поршня гідроциліндру $D = 100 \text{ мм}$, а тиск під поршнем $P = 100 \frac{\text{кгс}}{\text{см}^2}$

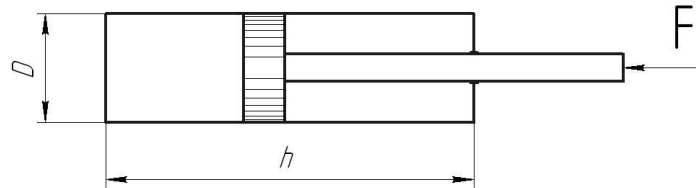


Рис. 2.3

Задача 11. Визначте абсолютний тиск, якщо показання п'єзометра $h = 150 \text{ мм}$ рт. ст. Відносна густина ртуті $\delta_{\text{рт}} = 13,6$. Атмосферний тиск $P_{\text{атм}} = 1,03 \frac{\text{кгс}}{\text{см}^2}$.

Задача 12. Визначте надлишковий тиск повітря, якщо густина повітря $\rho = 2,1 \text{ кг/м}^3$, $t = 50^\circ \text{ C}$, $R = 287 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{град}}$, $P_{\text{атм}} = 1 \frac{\text{кгс}}{\text{см}^2}$.

Задача 13. Визначте $h_{\text{вак}}$ і побудуйте епюри тиску на стінку водяного вакуумметра (рис. 2.4), якщо: $P_{\text{абс}} = 85 \text{ кПа}$; $P_{\text{атм}} = 10^5 \text{ Па}$.

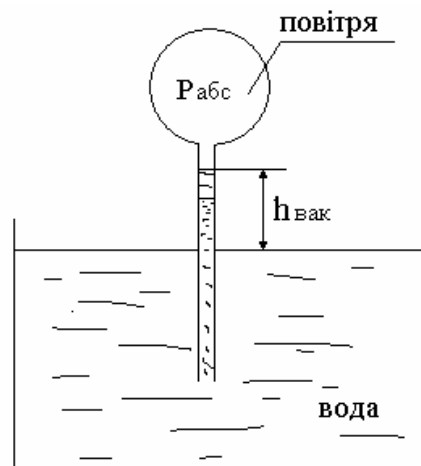


Рисунок 2.4

Питання для контролю знань

1. Що називають гідростатичним тиском? Що таке середній тиск і тиск у точці рідини?
2. Які одиниці вимірювання тиску в системах СГС, СІ, технічній системі? Які використовують несистемні одиниці тиску?
3. В чому полягає геометричний і фізичний сенс основного рівняння гідростатики?
4. Що називають абсолютним тиском, манометричним тиском і вакуумом?
5. Чому дорівнює максимальна величина вакууму?
6. Як обчислити тиск в будь-якій точці рідини?

3. РОЗРАХУНОК ТИСКУ РІДИНИ НА ПЛОСКІ І КРИВОЛІНІЙНІ ПОВЕРХНІ

Надлишкова сила гідростатичного тиску на плоску стінку дорівнює тиску в центрі ваги стінки, помноженій на її площу,

$$P = (p_0 + \rho g h'_c) S, \quad (3.1)$$

де h'_c – глибина занурення центру ваги стінки під вільною поверхнею (рис. 3.1); S – площа стінки; p_0 – надлишковий тиск на вільній поверхні рідини.

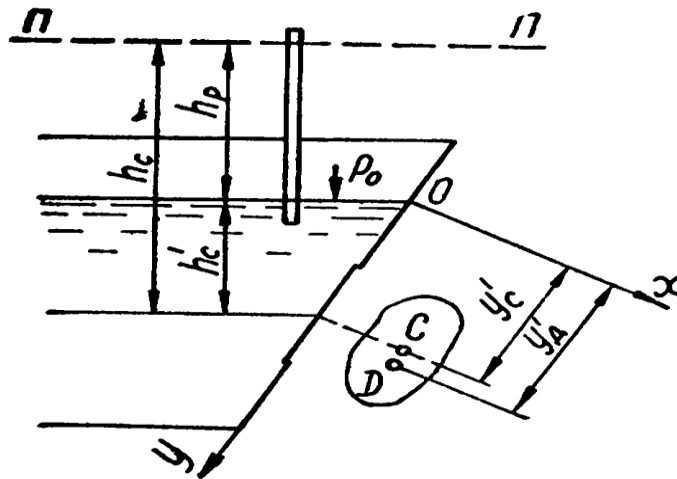


Рисунок 3.1 – Схема до визначення сили тиску на плоску стінку

Формулу (3.1) можна переписати у вигляді

$$P = P_0 + P_p,$$

де $P_0 = p_0 S$ – сила, обумовлена зовнішнім тиском; $P_p = \rho g h_c S$ – сила, обумовлена тільки тиском рідини.

Сила P_0 прикладена в центрі ваги стінки, сила P_p – в центрі тиску, координата якого визначається за формулою

$$y'_d = y'_c + \frac{J_0}{S y'_c},$$

де y'_c – координата центра ваги; J_0 – момент інерції плоскої фігури відносно центральної осі.

Надлишкова сила тиску на плоску стінку

$$P = \rho g h_c S,$$

де h_c – відстань від центра ваги стінки до п'єзометричної площини $\Pi-\Pi$.
сила гідростатичного тиску на криволінійну поверхню

$$P = \sqrt{P_x^2 + P_y^2 + P_z^2},$$

де P_x , P_y , P_z – складові сили надлишкового тиску по відповідним координатним осям.

Для циліндричної криволінійної поверхні (рис. 3.2)

$$P = \sqrt{P_x^2 + P_z^2},$$

де P_x , P_z – горизонтальна і вертикальна складові сили P .

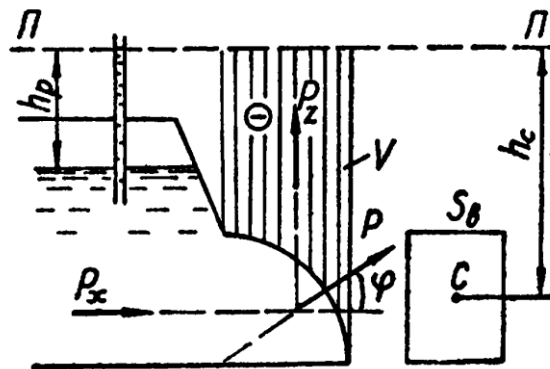


Рисунок 3.2 – Схема до визначення сили тиску на криволінійну стінку

Горизонтальна складова

$$P_x = \rho g h_c S_\theta,$$

де h_c – відстань від центра ваги вертикальної проекції до п'єзометричної площини; S_{ϕ} – площа проекції криволінійної поверхні на вертикальну площину.

Вертикальна складова

$$P_z = \rho g V,$$

де V – об'єм тіла тиску – вертикального стовпа рідини, розташованого між п'єзометричною площиною, криволінійною поверхнею і вертикальною проєктуючою поверхнею, що проходить по контуру стінки.

Вектор повної сили тиску на циліндричну поверхню проходить через вісь циліндра під кутом φ до горизонту, причому

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{P_z}{P_x}.$$

Задача 1. Побудувати епюри тиску і визначити силу на ділянку 2-3 (рис. 3.3), якщо $\rho_1 = 900 \cdot \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$; $H_1 = 0,5 \cdot \text{м}$; $\rho_2 = 1,2 \cdot \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$; $H_2 = 0,6 \cdot \text{м}$; $\phi_1 = \phi_2 = 0,3 \text{ м}$ - ширина стінки.

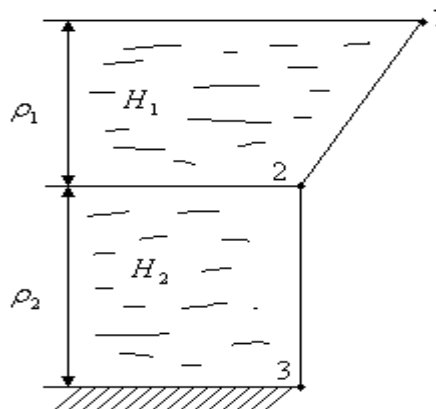


Рисунок 3.3

Задача 2. Побудувати епюри тиску (рис. 3.4), якщо $H_1 = 0,5 \cdot \text{м}$; $H_2 = 0,8 \cdot \text{м}$; $\rho = 0,7 \cdot \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$; $\alpha = 30^\circ$; $\phi = 0,4 \text{ м}$ - ширина стінки.

Задача 3. Побудувати епюри тиску і визначити рівнодійну силу тиску (рис. 3.5) графоаналітичним способом $H_1 = 1 \cdot \text{м}$; $H_2 = 0,45 \cdot \text{м}$; $\rho = 1 \cdot \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$; $\phi = 0,3 \text{ м}$ - ширина стінки.

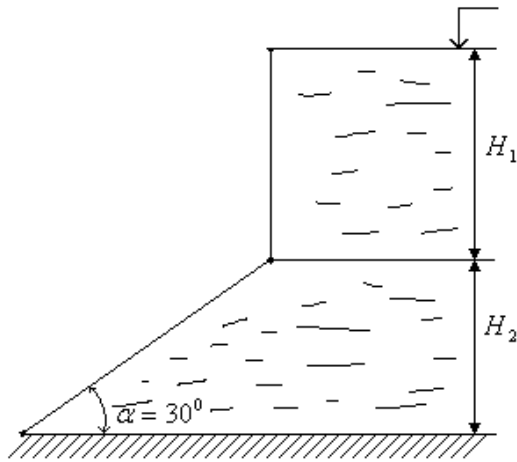


Рисунок 3.4.

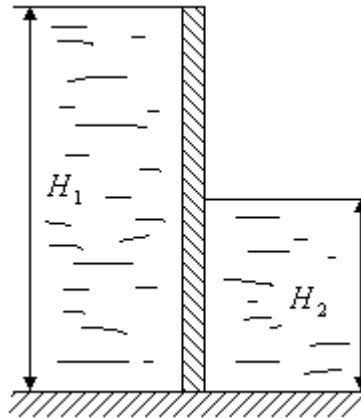


Рисунок 3.5

Задача 4. Побудувати епюри тиску і визначити силу тиску на ділянку 1-2 (рис. 3.6); $H_1 = 0,5 \cdot m$; $H_2 = 0,5 \cdot m$; $\rho = 700 \frac{г}{м^3}$; $\vartheta_{1-2} = 0,25 \cdot m$.

Задача 5. Побудувати епюри тиску на складну стінку і визначити силу тиску на ділянку 2-3 графоаналітичним способом (рис.3.7).

$H_1 = 0,5 \cdot m$; $H_2 = 0,6 \cdot m$; $H_3 = 0,4 \cdot m$; $\rho = 1 \frac{г}{см^3}$; $\vartheta_{2-3} = 0,3 \cdot m$.

Задача 6. Побудувати рівнодійну епюру тиску і визначити силу тиску графоаналітичним способом (рис. 3.8), якщо: $H = 1 \cdot m$; $\vartheta = 1 \cdot m$; $\rho_1 = 10^3 \frac{кг}{м^3}$. $\rho_2 = 1,2 \frac{г}{см^3}$.

Задача 7. Побудувати рівнодійну епюру тиску і знайти рівнодійну силу тиску графоаналітичним способом: $H_1 = 2 \cdot m$; $H_2 = 1 \cdot m$; $\vartheta = 1 \cdot m$; $\rho_1 = 1 \frac{г}{см^3}$; $\rho_2 = 1,2 \frac{г}{см^3}$ (рис.3.9).

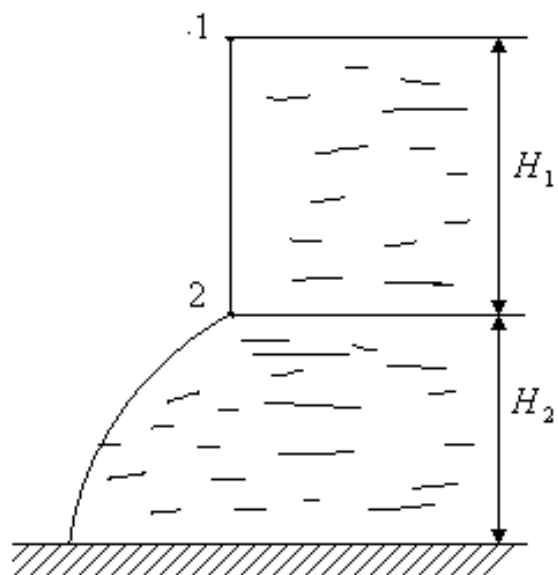


Рисунок 3.6

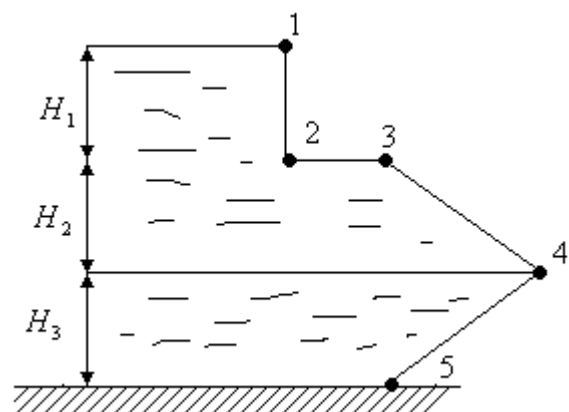


Рисунок 3.7

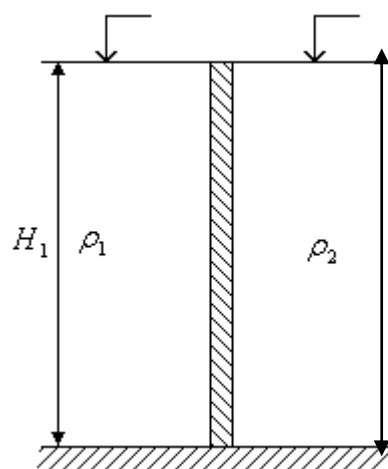


Рисунок 3.8

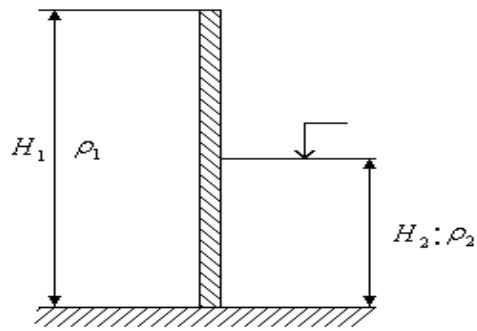


Рисунок 3.9

Задача 8. Визначте силу тиску на прямокутну кришку (рис. 3.10) і координати центра тиску при таких умовах: $a = 0,4\text{ м.}$; $b = 0,6\text{ м.}$; $H_0 = 1,5\text{ м.}$; $\rho = 900\text{ кг./м}^3$; $I_0 = \frac{ba^3}{12}$.

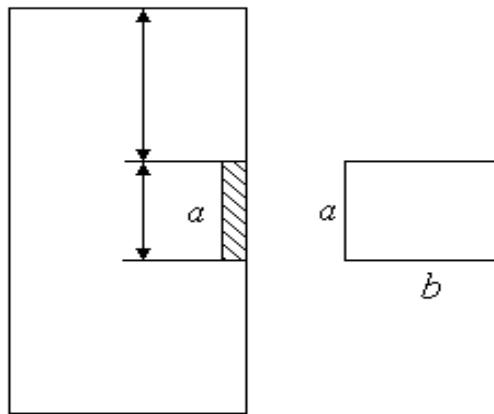


Рисунок 3.10

Задача 9. Побудувати епюру на похилу частину плоскої стінки і визначити рівнодійну силу тиску на цій ділянці графоаналітичним способом, якщо: $H_1 = 3\text{ м.}$; $H_2 = 2\text{ м.}$; $\rho = 1\text{ г/см}^3$; $b_{2-3} = 2\text{ м.}$ - ширина стінки 2-3. (рис. 3.11)

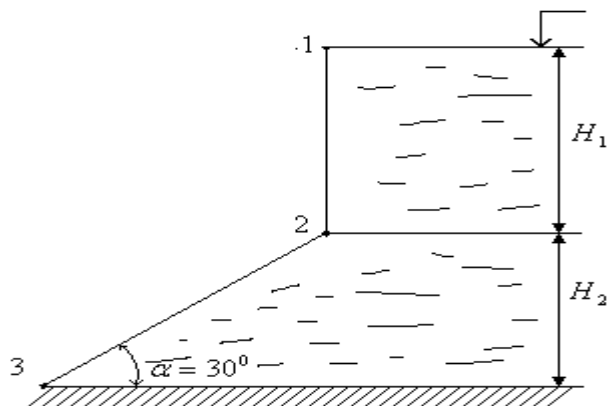


Рисунок 3.11

Задача 10. Визначте натяг троса, який удержує плоский затвор (рис. 3.12) шириною b , якщо глибина води перед тросом h . Вагою затвора знехтувати. Побудувати епюру тиску. Вихідні дані до задачі 10 наведені у таблиці 3.1.

Таблиця 3.1. Вихідні дані до задачі 10

Варіант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$B, \text{м}$	2.0	2.2	2.7	2.6	2.4	1.8	1.6	3.0	3.2	3.4
$H, \text{м}$	2.5	3.2	4.0	5.0	1.8	3.4	2.2	1.5	4.2	1.6

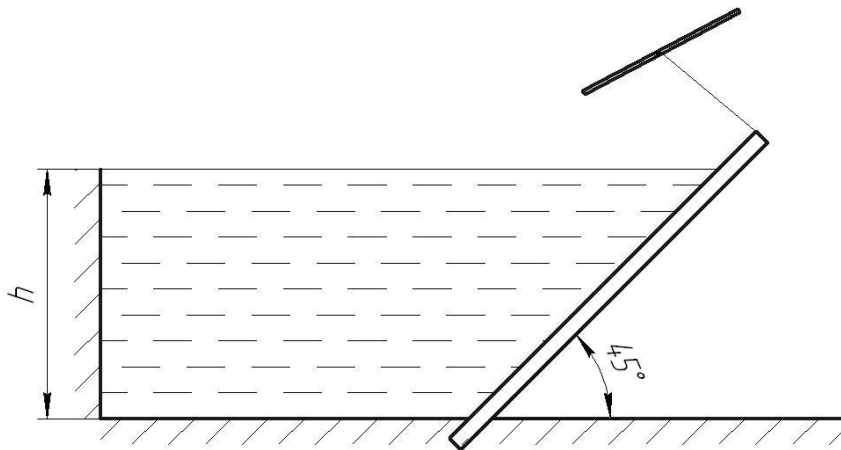


Рисунок 3.12

Задача 11. Визначте силу тиску води на квадратний затвор (рис. 3.13), який встановлений у вертикальній стінці, якщо відома відстань між центром ваги стінки і центром тиску e , а сторона квадрата – a . Вихідні дані до задачі 11 наведені у таблиці 3.2.

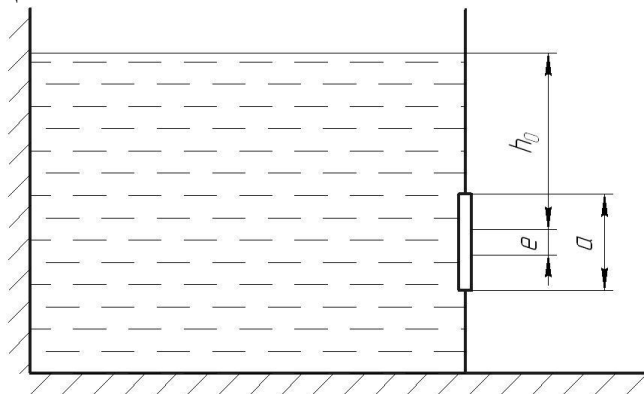


Рисунок 3.13

Таблиця 3.2. Вихідні дані для задачі 11

Варіант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$e, \text{см}$	6	7	8	9	10	12	14	5	11	15
$A, \text{м}$	0,8	1,0	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,8	2,0	0,9

Питання для контролю знань

1. Як визначають рівнодійну силу тиску на плоску горизонтальну і похилу стінки? В чому полягає відмінність цих формул?
2. Що називають центром тиску?
3. Як знаходять координати центра тиску?
4. Що називають тілом тиску. В якому випадку об'єм тіла тиску умовно вважають від'ємною величиною ?
5. Як визначаються горизонтальні і вертикальна складові рівнодійної сили тиску на криволінійну поверхню?
6. Вивести формулу для визначення товщини тонкостінних циліндрів.
7. Які сили діють на рідину у випадках відносного спокою рідини?

4. РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ПОТОКУ В КАНАЛАХ

Рух рідини може бути усталеним і неусталеним, рівномірним і нерівномірним, напірним і безнапірним, плавно змінним і раптово змінним, ламінарним і турбулентним.

Усталеним називається такий рух рідини, при якому швидкість і тиск у будь-якій її точці на протязі часу не змінюються. При неусталеному русі швидкість і тиск рідини змінюються з часом.

Усталений рух називається рівномірним, якщо живі перерізи потоку, середні швидкості і місцеві швидкості у відповідних точках всіх живих перерізів однакові. При відсутності цієї умови рух називається нерівномірним.

Напірним називається такий рух рідини в закритому руслі, при якому потік не має власної поверхні, а тиск відрізняється від атмосферного. При безнапірному русі рідина має вільну поверхню, а тиск у всіх точках якої дорівнює атмосферному.

Лінією току називається лінія, проведена в рідині так, що у будь-якій її точці вектор швидкості в даний момент часу направлений по дотичній до неї. Рух рідини називається плавно змінним, якщо кривизна ліній току і кут розходження між ними незначні.

Трубчаста поверхня, утворена лініями току, проведеними через всі точки нескінченно малого замкнутого контуру у рухомій рідині називається трубкою току. Частина потоку, зосереджена всередині трубки току, називається елементарною струминкою. Потік – це сукупність елементарних струминок.

Живим перерізом називається поверхня всередині потоку, нормальна в кожній точці до відповідної лінії току. Частина периметра живого перерізу, що стикається з твердими стінками, називається змоченим периметром. Відношення площі живого перерізу S до змоченого периметру Π називається гідравлічним радіусом:

$$R = S / \Pi.$$

Для круглої труби при напірній течії $R = d / 4$, або $d = 4R$. Гідравлічний діаметр

$$d_e = 4R.$$

Наприклад, для напірного потоку в трубі прямокутного поперечного перерізу ($b \cdot h$) гідравлічний радіус і гідравлічний діаметр відповідно дорівнюють:

$$R = \frac{S}{\Pi} = \frac{bh}{2(b+h)}, \quad d_e = \frac{2bh}{b+h}.$$

Об'ємною витратою називається кількість рідини, що проходить через живий переріз потоку за одиницю часу. Вона може бути виміряна об'ємним способом

$$Q = V / T,$$

де V – об'єм мірного баку, T – час його наповнення, а також розрахований за формулою

$$Q = \int_s u dS, \quad (4.1)$$

де dS – площа перерізу елементарної площадки, u – місцева швидкість в центрі ваги цієї площадки.

Середньою швидкістю v називається така фіктивна швидкість, однакова для всіх точок живого перерізу, при якій витрата, розрахована за формулою

$$Q = vS,$$

дорівнювала б фактичній витраті, розрахованій за (4.1):

$$v = \frac{\int_s u dS}{S}.$$

При усталеному русі рідини витрата через всі живі перерізи потоку однакова:

$$Q = v_1 S_1 = v_2 S_2 = \dots = v_n S_n = \text{const} \quad (4.2)$$

де $v_1, v_2, \dots, v_n$ – середні швидкості, $S_1, S_2, \dots, S_n$ – площа живих перерізів.

Вираз (4.2) називається рівнянням витрати, або рівнянням нерозривності. З нього витікає, що середні швидкості обернено пропорційні площі живих перерізів:

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{S_2}{S_1}.$$

Задача 1. Визначити середню швидкість рідини в трубопроводі з діаметром 0,9м, при витраті $0,21 \text{ м}^3/\text{с}$.

Задача 2. Визначити діаметр трубопроводу з рідиною, що протікає з витратою 500 м^3 за годину зі швидкістю $1,5 \text{ м/с}$.

Задача 3. По трубі зі змінним перерізом тече вода. Визначити швидкість у другому перерізі, якщо у першому швидкість дорівнює $0,25 \text{ м/с}$. Відповідно діаметр першого перерізу $1,8 \text{ м}$ і другого 1 м .

Задача 4. Конічна труба має діаметри відповідно на вході і виході $d_1 = 400 \text{ мм}$ і $d_2 = 200 \text{ мм}$. Середня швидкість рідини на виході дорівнює 1 м/с . Визначити середню швидкість в перерізі на вході і витрату рідини.

Питання для контролю знань

1. Лінія току, траєкторія, трубка току, джерела і стоки.
2. Висновок і фізичне тлумачення рівняння нерозривності.
3. Висновок диференціального рівняння руху ідеальної рідини (Ейлера).
4. Місцева і миттєва швидкості. Класифікація рухів рідини.
5. Лінія течії і її властивості.
6. Поверхня трубки течії і її властивості.
7. Живий переріз в потоці рідини.
8. Зміна швидкості в живому (поперечному) перерізі елементарної струминки.
9. Потік рідини. Середня швидкість в поперечних перерізах потоку.
10. Витрата рідини потоку.
11. Закон нерозривності потоку рідини.
12. В чому полягає принцип Д'аламбера щодо рухомої частинки рідини.
13. Під дією яких сил знаходиться рухома частинка рідини.

5. РІВНЯННЯ БЕРНУЛЛІ

Для двох перерізів потоку крапельної рідини при плавно змінному русі рівняння Бернуллі має вигляд

$$\frac{\alpha v_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\rho g} + z_1 = \frac{\alpha v_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\rho g} + z_2 + h_e,$$

де v_1 і v_2 – середні швидкості відповідно у першому і другому перерізах; p_1 і p_2 – тиски; z_1 і z_2 – відстані від довільної горизонтальної площини порівняння до центрів перерізів; h_e – втрата питомої енергії (напору) між перерізами.

Рівняння Бернуллі для потоку газу при $\rho = \text{const}$ має вид:

$$\frac{\alpha v_1^2 \rho}{2} + p_1 + \rho g z_1 = \frac{\alpha v_2^2 \rho}{2} + p_2 + \rho g z_2 + p_e,$$

де p_e – втрата тиску.

З енергетичної точки зору член $\alpha v^2/2g$ являє собою питому (віднесену до одиниці маси рідини) кінетичну енергію в перерізі, $p/\rho g$ – питома енергія тиску у певному перерізі, z – питома енергія положення у перерізі.

З геометричної точки зору складові рівняння Бернуллі являють собою наступне: z – висоту, на якій розташовується центр живого перерізу над площиною порівняння $O-O$ (рис. 3.3), $p/\rho g$ – п'єзометричну висоту, яку можна виміряти п'єзометричною трубкою, $\alpha v^2/2g$ – висоту швидкісного напору, що дорівнює різниці рівнів у трубках повного і статичного напорів. Суму висот

$$\frac{\alpha v^2}{2g} + \frac{p}{\rho g} + z = H$$

називають повним напором.

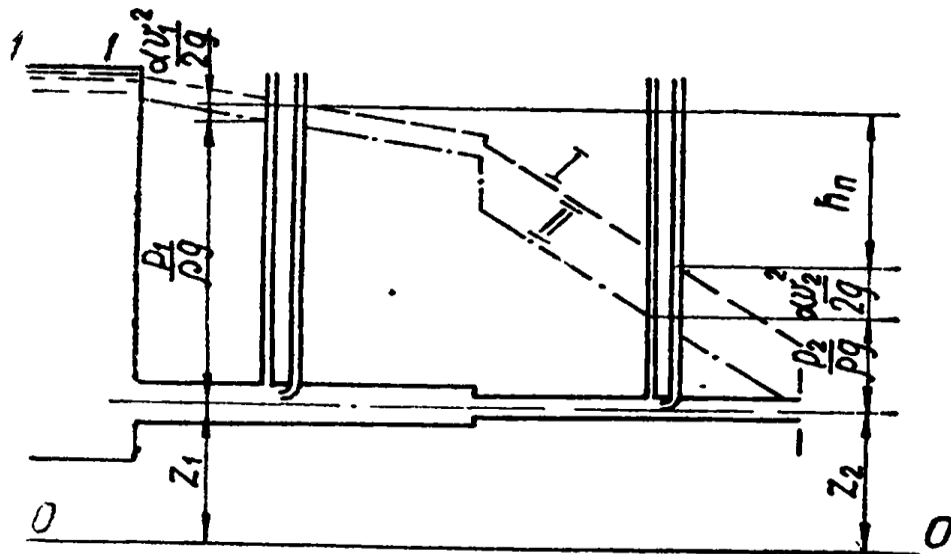


Рисунок 5.1 – Діаграма рівняння Бернуллі

На рисунку 5.1 показана діаграма рівняння Бернуллі, де I – напірна лінія, або лінія повного напору; II – п'єзометрична лінія, або лінія зміни п'єзометричних висот.

Гідравлічний ухил – зміна повного напору на одиницю довжини:

$$I = \frac{h_g}{L} = \frac{\left(\frac{\alpha v_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\rho g} + z_1 \right) - \left(\frac{\alpha v_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\rho g} + z_2 \right)}{L}.$$

П'єзометричний ухил – це зміна п'єзометричного напору на одиницю довжини:

$$I_p = \frac{\left(\frac{p_1}{\rho g} + z_1 \right) - \left(\frac{p_2}{\rho g} + z_2 \right)}{L}.$$

Коефіцієнт α (коефіцієнт Коріоліса) являє собою відношення дійсної кінетичної енергії до кінетичної енергії, підрахованої по середній швидкості. При турбулентному режимі руху $\alpha \approx 1$, при ламінарному у круглій трубі $\alpha = 2$.

За допомогою рівняння Бернуллі вирішують велику кількість задач практичної гідро газодинаміки. Для цього вибираються два перерізи потоку так, щоб в одному з них величини z , p і v були відомі, а у другому невідомою була лише одна величина. Потім вибирається горизонтальна площина порівняння. Її доцільно провести через центр одного з вибраних перерізів, тоді z_1 або z_2 буде дорівнювати нулю. Після спрощень рівняння Бернуллі, записаного для вибраних перерізів, знаходять невідому величину (p , v або z).

При двох невідомих крім рівняння Бернуллі, використовується також рівняння нерозривності руху.

Задача 1. Визначити витрату води, яка витікає з труби діаметром 45 мм і довжиною 400 м під напором $H=2,5$ м. Площа вільної поверхні води значно більша за переріз трубопроводу.

Задача 2. З напірного баку вода тече по трубі (рис. 5.2) діаметром $d_1 = 20$ мм, а потім витікає в атмосферу через насадок діаметром $d_2 = 10$ мм. Надлишковий тиск повітря в баці $p_0 = 0,18$ МПа; рівень води в баці $H = 1,6$ м. Нехтуючи втратами енергії, визначте швидкість води в трубі v_1 і на виході з насадку v_2 .

Задача 3. Визначити тиск у перерізі 2-2 (рис. 5.3), якщо $Q = 180$ л/хвил; $d_1 = 40$ мм.; $d_2 = 20$ мм.; $p_1 = 180$ кПа.; $H = 1,5$ м.; $\rho = 900$ кг/м³. Втрати не враховувати.

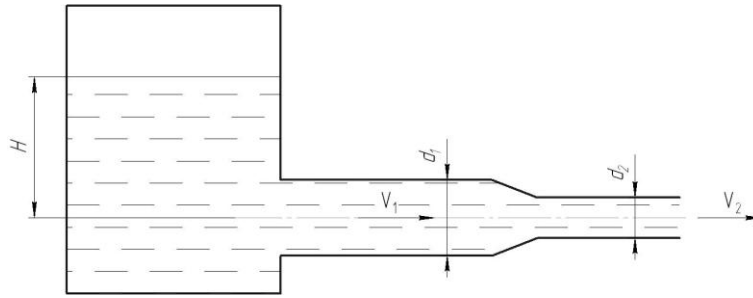


Рисунок 5.2

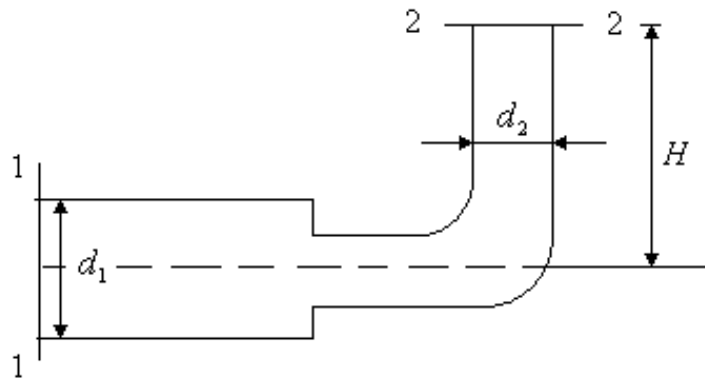


Рисунок 5.3

Задача 4. На яку висоту може всмоктуватись вода з резервуару по трубопроводу, який приєднано до вузького перерізу горизонтального трубопроводу (рис.5.4), якщо: $Q = 1 \text{ л/с}$; $p_1 = 10 \text{ кПа}$; $d_2 = 10 \text{ мм.}$; $d_1 = 40 \text{ мм.}$

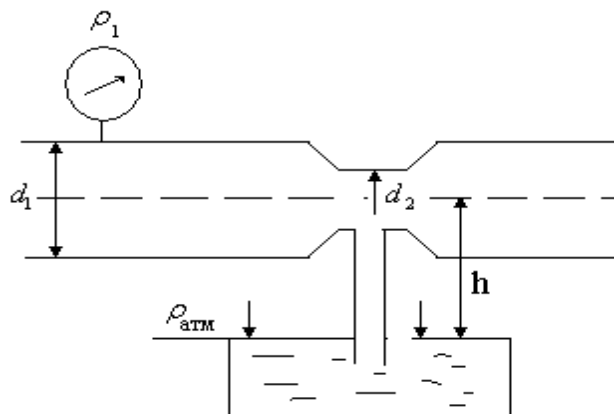


Рисунок 5.4

Задача 5. Визначте витрату води, якщо різниця рівней води в п'єзометричних трубках $h = 1.5 \text{ м}$; діаметри трубопроводу $D = 40 \text{ мм.}$; $d = 20 \text{ мм.}$ (рис. 5.5). Втрати напору не враховувати.

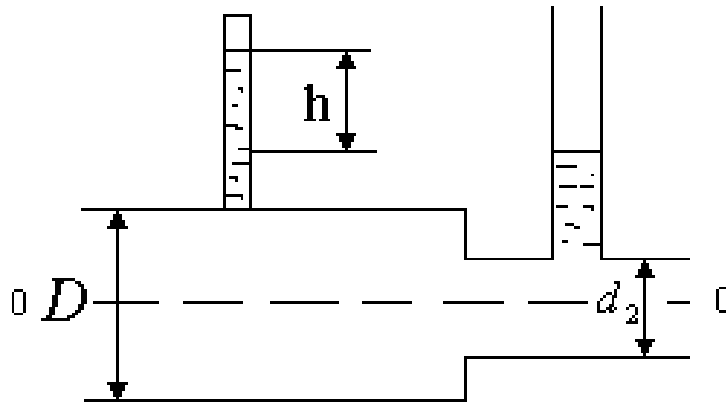


Рис. 5.5

Задача 6. Визначте витрату води (рис. 5.6) , якщо: $p_1 = 39240 \text{ Па}$;
 $d_1 = 200 \text{ мм.}$; $\frac{P_{\text{вак}}}{\rho g} = 3 \text{ м.}$ водного стовпчика – вакуум; $d_2 = 100 \text{ мм.}$

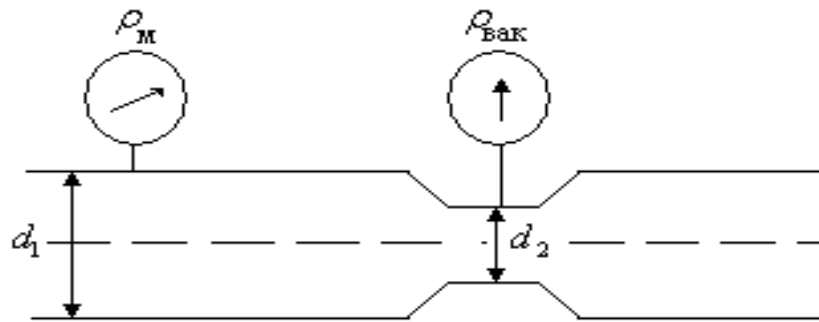


Рисунок 5.6

Задача 7. З резервуару по трубі змінного перерізу рідина витікає в атмосферу. Вважаючи рідину ідеальною, визначити швидкість витікання, витрату рідини і тиск на кожній ділянці трубопроводу (рис. 5.7). Побудувати п'єзометричну і напірні лінії, якщо рівень рідини в резервуарі H , м ; діаметри труб d_1, d_2, d_3 , мм; густина рідини $\rho, \text{кг/м}^3$. Вихідні дані до задачі 73 наведені у таблиці 5.1.

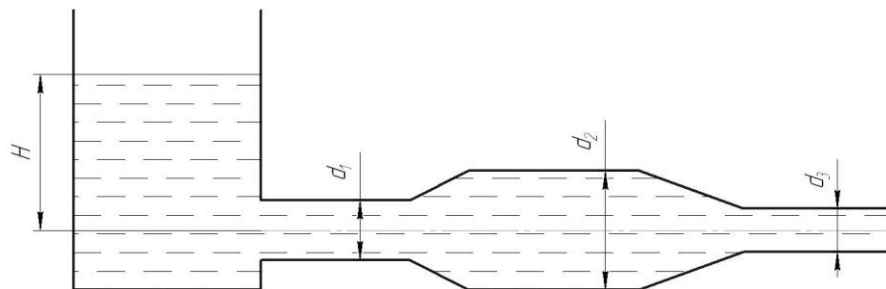


Рисунок 5.7

Таблиця 5.1- Вихідні дані до задачі 7

Варіант	H, м	$\rho, \text{кг/м}^3$	$d_1, \text{мм}$	$d_2, \text{мм}$	$d_3, \text{мм}$
1	3,0	900	32	64	40
2	2,8	950	25	50	32
3	2,6	850	16	32	20
4	2,4	890	40	80	50
5	2,2	1000	50	100	63
6	2,0	700	63	125	70
7	1,8	750	15	30	20
8	1,6	910	20	40	32
9	1,4	856	40	80	50
10	1,2	998	10	20	16
11	1,0	835	12	24	16
12	0,8	840	20	40	32
13	0,6	825	16	32	20
14	0,5	915	10	20	15
15	0,4	1000	8	16	12

Задача 8. Визначте витрату нестисливої нев'язкої рідини у трубопроводі змінного перерізу (рис. 5.8) і побудуйте напірну і п'єзометричну лінії, якщо відомі відмітки z_1 і z_2 , надлишковий тиск на поверхні рідини в резервуарі p_1 і у вихідному перерізі тиск атмосферний - $p_{\text{атм}}$. Діаметри труб d_1, d_2, d_3 . Густина рідини $\rho = 850 \text{кг/м}^3$. Вихідні дані до задачі 74 наведені у таблиці 5.

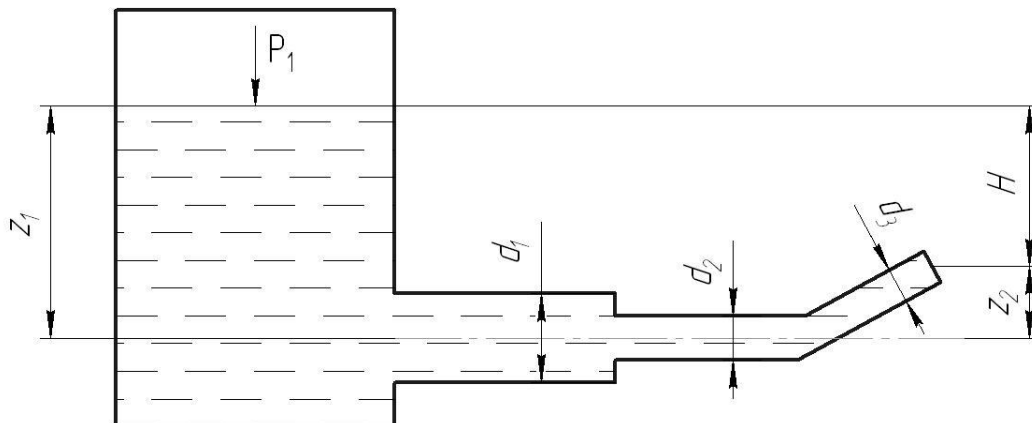


Рисунок 5.8

Таблиця 5.2 - Вихідні дані до задачі 8

Варіант	$d_1, \text{мм}$	$d_2, \text{мм}$	$d_3, \text{мм}$	$p_1, \text{кПа}$	$z_1, \text{м}$	$z_4, \text{м}$
1	125	65	75	60	4,0	2,0
2	130	70	80	50	4,2	2,2
3	140	75	80	70	4,4	2,5
4	150	80	90	80	4,6	2,8
5	175	90	100	80	4,8	3,0
6	200	100	110	90	5,0	2,5
7	160	80	90	45	5,2	2,7
8	150	75	90	50	5,4	3,0

9	100	50	75	70	5,6	2,8
10	140	70	90	60	5,1	2,0
11	90	45	50	40	4,9	1,5
12	120	60	80	30	5,3	1,9
13	250	125	150	50	6,0	2,0
14	300	150	175	80	6,1	2,1
15	350	175	200	90	6,5	2,3

Питання для контролю знань

1. Який геометричний сенс має рівняння Д.Бернуллі для елементарної струминки ідеальної рідини ?
2. Який фізичний і механічний сенс має рівняння Д.Бернуллі для елементарної струминки ідеальної рідини.
3. Чим відрізняється рівняння Д.Бернуллі для струминки реальної рідини від аналогічного рівняння для ідеальної рідини?
4. Що називають повним гідродинамічним напором?
5. Який рух рідини вважають плавно змінним? Які він має особливості?
6. Який фізичний сенс коефіцієнта Коріоліса? Від чого залежить значення цього коефіцієнта

6. ВТРАТИ НАПОРУ ПО ДОВЖИНІ І В МІСЦЕВИХ ОПОРАХ. ГІДРАВЛІЧНИЙ РОЗРАХУНОК ТРУБОПРОВОДІВ

Рух в'язкої рідини супроводжується втратами напору, обумовленими гідравлічними опорами. Визначення втрат напору є одним з головних питань будь-якого гідродинамічного розрахунку. Розрізняють два види втрат напору – втрати на тертя по довжині, що залежать від довжини і розмірів

поперечного перерізу трубопроводу, його шорсткості, в'язкості рідини, швидкості руху, і втрати у місцевих опорах – коротких ділянках трубопроводів, в яких відбувається зміна швидкості по величині або напрямку:

$$h_n = h_{mp} + \Sigma h_m.$$

де h_{mp} – втрати на тертя; Σh_m – сума втрат у місцевих опорах.

При русі рідини в круглих трубах постійного перерізу втрати напора на тертя визначаються за формулою Дарсі-Вейсбаха:

$$h_{mp} = \lambda \frac{l}{d} \frac{v^2}{2g}, \quad (6.1)$$

де λ – коефіцієнт гідравлічного тертя по довжині, або коефіцієнт Дарсі; l – довжина трубопроводу; d – його діаметра; v – середня швидкість течії рідини. Для ламінарного режиму руху в круглій трубі коефіцієнт λ визначається за теоретичною формулою

$$\lambda = 64/Re,$$

в якій Re – число Рейнольдса.

При турбулентному режимі руху коефіцієнт λ залежить від числа Рейнольдса і відносної шорсткості Δ/d (де Δ – еквівалентна шорсткість) і визначається за емпіричними формулами. При цьому розрізняють три області гідравлічних опорів – гідравлічно гладких труб, перехідну і квадратичну.

Для області гідравлічно гладких труб коефіцієнт гідравлічного тертя λ визначається за формулою Блазіуса

$$\lambda = 0,3164/Re^{0,25}/$$

Область гідравлічно гладких труб має місце при $3000 < Re < 20d/\Delta$. У перехідній області ($20d/\Delta < Re < 500 d/\Delta$) коефіцієнт гідравлічного тертя можна визначити за універсальною (що застосовується для всіх областей) формулою Альтшуля

$$\lambda = 0,11(\Delta/d + 68/Re)^{0,25}.$$

В квадратичній області опору (області гідравлічно шорстких труб) коефіцієнт λ може бути знайдено за формулою Шифринсона

$$\lambda = 0,11(\Delta/d)^{0,25}.$$

Втрати напора у місцевих опорах визначаються за формулою Вейсбаха

$$h_m = \zeta v_2^2 / 2g, \quad (6.2)$$

де ζ – коефіцієнт місцевого опору; v_2 – швидкість після місцевого опору (в деяких випадках значення коефіцієнта ζ відносять і до швидкості v_1 до місцевого опору). У більшості випадків коефіцієнт ζ визначають за довідковими даними, одержаними на підставі дослідних даних. При раптовому розширенні русла втрати напору при турбулентному русі можуть бути знайдені за теоретичною формулою

$$h_{pp} = \frac{(v_1 - v_2)^2}{2g},$$

де v_1 та v_2 – швидкості до і після раптового розширення.

Простим називається трубопровід сталого або змінного перерізу, який не має відгалужень і в якому витрата рідини постійна по довжині (рис. 6.1). Початковим для гідравлічного розрахунку трубопроводу є рівняння Бернуллі, яке внаслідок сталості швидкостей по довжині приймає вид

$$H = \left(\frac{p_1}{\rho g} + z_1 \right) - \left(\frac{p_2}{\rho g} + z_2 \right) = \left(\lambda \frac{l}{d} + \sum \zeta \right) \frac{v^2}{2g}, \quad (6.3)$$

рівняння нерозривності (3.7), а також залежності для визначення втрат напору на тертя по довжині (6.1) і в місцевих опорах (6.2).

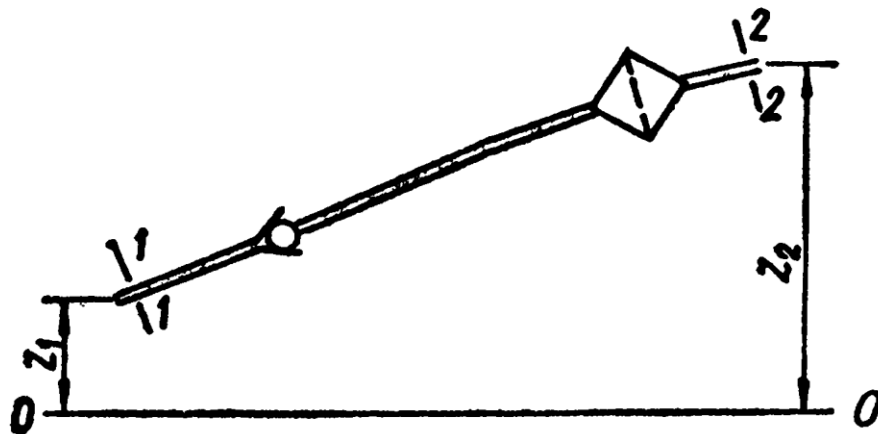


Рисунок 6.1

При розрахунку трубопроводів виникає три основні задачі.

Задача 1. При відомих діаметрі d , довжині l і витраті Q визначити необхідний напір H .

З рівняння (6.3), де $v = \frac{4Q}{\pi d^2}$, одержимо

$$H = \frac{16Q^2}{2\pi^2 d^4 g} \left(\lambda \frac{l}{d} + \sum \zeta \right). \quad (6.4)$$

Задача 2. Визначити Q , знаючи H та інші величини. Вирішуючи попереднє рівняння відносно Q , одержуємо:

$$Q = \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{\frac{2gH}{\lambda \frac{l}{d} + \sum \zeta}}.$$

Задача 3. Визначити діаметр трубопроводу, якщо відомі H та інші величини. Щоб знайти діаметр, треба рівняння (6.4) вирішити відносно діаметра. Однак рівняння має складну залежність від діаметра, і задача вирішується або шляхом підбору або графо-аналітично. При вирішенні задачі шляхом підбору задаються величини діаметра до тих пір, поки не буде задоволено рівняння. При графо-аналітичному методі, підставляючи різні величини діаметра в рівняння (6.4), одержують різні величини H , потім за одержаними точками будують залежність H від d і, відклавши по осі H заданий напір, на побудованій кривій знаходять точку з шуканим діаметром.

Задача 1. Визначити надлишковий тиск в трубопроводі на виході з насоса, якщо витрата води по трубопроводу складає $24 \text{ м}^3/\text{год}$. Довжина трубопроводу 120 м , висота $h = 960 \text{ мм}$, діаметр труби $d = 100 \text{ мм}$, еквівалентна шорсткість $\Delta_e = 0,5 \text{ мм}$, ступінь відкриття засувки $0,7$, радіус закруглення відводів $R = 200 \text{ мм}$.

Задача 2. Визначте повні втрати тиску у напірній гідролінії, якщо витрата робочої рідини Q ; л/хвил, Діаметр гідролінії D , мм довжина гідролінії l , м. Робоча рідина має густину ρ , кг/м^3 , кінематична в'язкість ν , сСт . Напірна гідролінія має 2 повороти ($\xi_{\text{пов}} = 0,39$) і гідророзподільник, втрати тиску в якому $\Delta P = 0,18 \text{ МПа}$. Еквівалентна рівномірно-зерниста шорсткість k_e , мм. Вихідні дані до задачі 2 наведені у таблиці 7.

Таблиця 6.1 - Вихідні дані для задачі 2

Варіант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Q , л/хв	60	90	120	140	150	160	180	200	220	240	260	300	320
D , мм	10	16	20	25	25	32	32	40	40	50	50	63	63
l , м	5,0	5,2	6,0	6,4	7,0	7,5	8,0	8,2	8,4	8,6	9,0	9,2	9,5
ρ , кг/м^3	929	900	890	880	865	858	850	848	830	820	825	845	910
ν , сСт	1,2	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	15	20
k_e , мм	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	1,1	1,2	1,5

Задача 3. По трубопроводу довжиною 1378 м перекачується 36 м³/год вода з швидкістю 1,28 м/с. Необхідно визначити діаметр трубопроводу і втрати напору, якщо на ньому розташовано зворотний клапан ($\zeta=1.7$), засувка ($\zeta=0,6$) і поворот на 90 ° ($\zeta= 1,2$). Коефіцієнт гідравлічного тертя λ на трубопроводі дорівнює 0,03.

Питання для контролю знань

1. Чому в реальних рідинах виникають втрати напору? Які існують втрати напору?
2. Як обчислюються втрати напору по довжині при ламінарному русі?
3. Які існують зони опору при турбулентному русі?
4. Чим відрізняються області гладкостінного, доквадратичного та квадратичного опору одна від одної та як в цих областях обчислюється коефіцієнт Дарсі?
5. Які втрати напору називають місцевими? Як визначаються втрати напору в місцевих опорах в квадратичній області опору?
6. Причини виникнення місцевих втрат.
7. Як визначаються втрати напору в місцевих опорах при ламінарному русі?
8. Як визначити еквівалентну довжину трубопроводу?
9. Що таке витратомірна характеристика трубопроводу?
10. В чому полягає гідравлічний розрахунок простого (довгого) трубопроводу?
11. Визначення витрати рідини при протіканні її через короткий трубопровід.
12. Що називається сифонним трубопроводом? Характерні особливості його гідравлічного розрахунку.
13. Особливості гідравлічного розрахунку при шляховій витраті рідини в трубопроводі.
14. Особливості гідравлічного розрахунку при змішаній витраті, що протікає через трубопровід.
15. Яким чином вибирається економічно вигідна швидкість руху рідини в трубопроводі?
16. Що таке гідравлічний радіус? З якою метою вводиться це поняття?
17. Що таке еквівалентний діаметр трубопроводу? З якою метою вводиться це поняття?
18. Що називається еквівалентною довжиною трубопроводу?
19. Що лежить в основі гідравлічного розрахунку складних трубопроводів?
20. Принцип гідравлічного розрахунку тупикового трубопроводу.
21. Принцип гідравлічного розрахунку паралельно-розгалуженого трубопроводу.

7. РОЗРАХУНОК ХАРАКТЕРИСТИК ЛОПАТЕВИХ НАГНІТАЧІВ

Нагнітачі – машини для переміщення крапельних рідин називаються насосами, а газів – вентиляторами і компресорами. За тиском, що створюється, область застосування насосів і компресорів майже не обмежена, а вентиляторів у відповідності з рекомендаціями СЕВ обмежується 30 кПа. Компресори для невеликих тисків, коли відсутня потреба в охолодженні стиснутого газу, називають повітродувками.

За принципом дії нагнітачі поділяють на об'ємні і лопатеві. Об'ємні нагнітачі, що працюють при поступальному русі робочого органу, - це поршневі, при обертальному – пластинчасті і зубчасті.

Всі лопатеві нагнітачі, що працюються при обертальному русі робочого органу (колеса), - відцентрові (радіальні), осьові, вихрові.

Тиск в об'ємних нагнітачах підвищується за рахунок безпосереднього стиснення рідини, а в лопатевих – при її закручування.

Нагнітачі класифікуються також по цілій низці інших ознак – наприклад, в залежності від приводу, виду з'єднання, особливостей розташування та ін.

Характеристики нагнітачів

Для підбору і аналізу роботи нагнітачів потрібно знати взаємозв'язок між основними їх параметрами – подачею Q , напором H або тиском p , потужністю N , ККД η , густиною рідини, що переміщається ρ , геометричним розміром D , частотою обертання ω .

Об'ємна подача (продуктивність) Q – це співвідношення об'єму рідини, що подається до часу;

Напір нагнітача H – величина, що визначається залежністю

$$H = p/\rho g,$$

де g – прискорення вільного падіння.

При рішенні практичних задач напір нагнітача часто визначають за виразом

$$H = (z_k - z_n) + \frac{p_k - p_n}{\rho g} + \frac{v_k^2 - v_n^2}{2g},$$

або за формулою

$$H = \frac{p_{\text{ман}} + p_{\text{вак}}}{\rho g} + \Delta z + \frac{v_k^2 - v_n^2}{2g}.$$

де z_k і z_n – висота центра ваги перерізу виходу і входу в нагнітач; p_k і p_n – тиск на виході і на вході в нагнітач; v_k і v_n – швидкість рідкого середовища на виході і на вході в нагнітач; $p_{\text{ман}}$ і $p_{\text{вак}}$ – тиск на виході і вакуум на вході в нагнітач; Δz – відстань по вертикалі між точкою підключення вакуумметра і центром манометра (рис. 7.1).

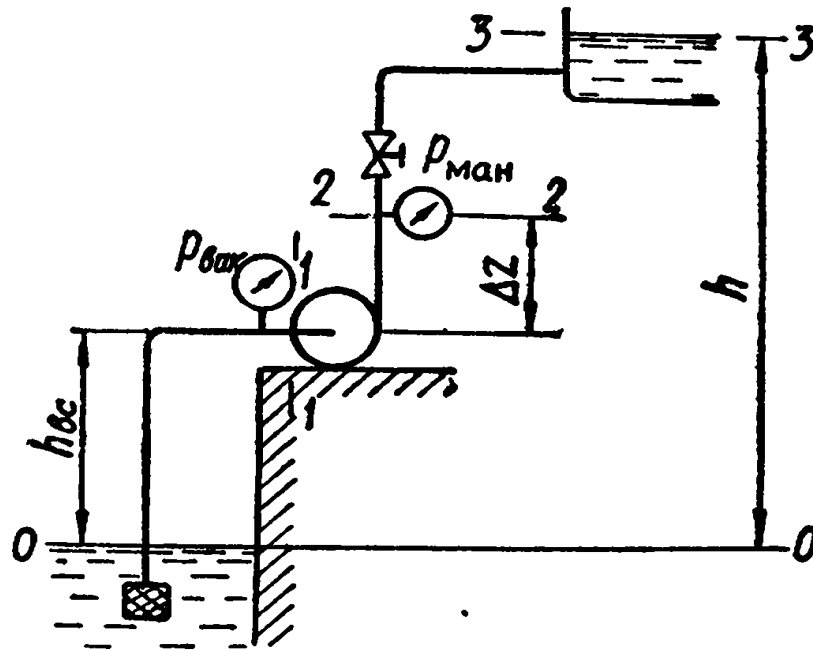


Рисунок 7.1.

Тиск насоса p – це величина, що визначається залежністю

$$p = p_k - p_n + \frac{\rho}{2}(v_k^2 - v_n^2) + \rho g(z_k - z_n).$$

Ідеальна подача рідкого середовища визначається геометричними розмірами і частотою обертання (швидкістю руху) робочих органів, а також конструктивними факторами:

$$Q_i = kR_2n,$$

де k – конструктивний параметра; R_2 – радіус робочого колеса на виході потоку рідкого середовища; n – частота обертання робочого колеса.

Корисна потужність насоса N_k – це потужність, що передається насосом рідині:

$$N_k = pQ = \rho gQH.$$

Потужність, споживана насосом, розраховується за формулою

$$N = M\omega,$$

де M – крутний момент на валу насоса; ω – кутова швидкість обертання вала.

Потужність насоса N більше корисної потужності N_k внаслідок втрат всередині насоса. Ефективність конструкції визначається ККД насоса – відношенням корисної потужності до потужності насоса:

$$\eta = \frac{N_k}{N} = \frac{\rho gQH}{M\omega} = \frac{pQ}{M\omega}.$$

З останніх виразів випливає, що

$$N = \frac{\rho gQH}{\eta} = \frac{pQ}{\eta}.$$

Остання залежність дає змогу підібрати двигун для приводу насоса і розрахувати потужність, необхідну для його роботи.

Лопатеві нагнітачі

Основною частиною лопатевого нагнітача є робоче колесо з лопатями, що обертається. Енергія від робочого колеса передається рідині шляхом динамічної взаємодії лопатей колеса з обтікаючою їх рідиною. До лопатевих нагнітачів відносяться відцентрові та осьові.

На рис 7.2 показана схема одноступеневого відцентрового нагнітача консольного типу. Проточна частина нагнітача складається з трьох основних елементів: робочого колеса 1, підводу 2 і спірального відводу 3. По підводу рідина надходить в робоче колесо із всмоктувального трубопроводу.

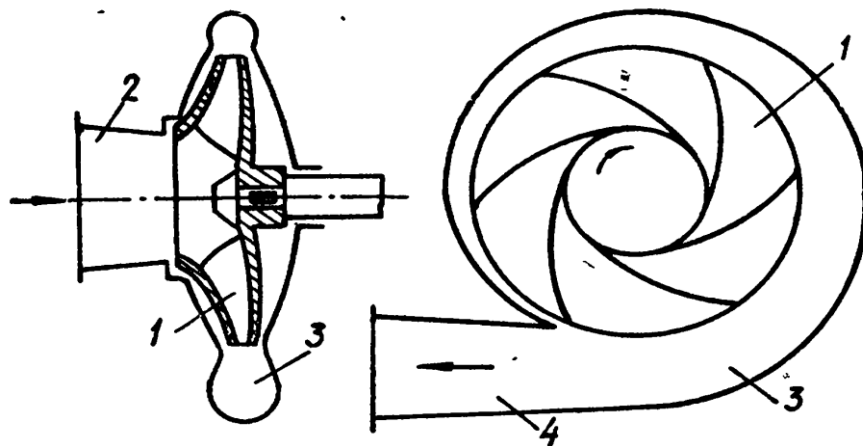


Рисунок 7.2 – Схема відцентрового насоса

Робоче колесо складається з двох дисків, між якими знаходяться лопаті, загнуті у бік, протилежний напрямленню обертання колеса. При обертанні колеса рідина безперервно відкидається під дією відцентрової сили у спіральний відвід зі збільшеною швидкістю і підвищеним тиском.

Спіральний відвід має завиткоподібну форму і призначений для вловлювання вихідної з колеса рідини і часткового перетворення кінетичної енергії в енергію тиску. подальше перетворення кінетичної енергії відбувається у дифузори 4, який встановлюється на відводі.

Рух частинок рідини в робочому колесі є складним. Він складається з переносного руху (обертання разом з робочим колесом) і відносного руху вздовж лопатей. Швидкість переносного руху u перпендикулярна до радіусу колеса, швидкість відносного руху w при нескінченній кількості лопатей спрямована по дотичній до профілю лопаті.

Абсолютна швидкість v дорівнює геометричній сумі складових швидкостей, тобто $\vec{v} = \vec{u} + \vec{w}$ (рис. 7.3).

Кут між векторами швидкостей $\vec{v}$ і $\vec{u}$ позначимо α , а між дотичною до лопаті і дотичною до окружності - через β . Величини, що відносяться до входу на лопатку, позначають індексом 1, до виходу – індексом 2.

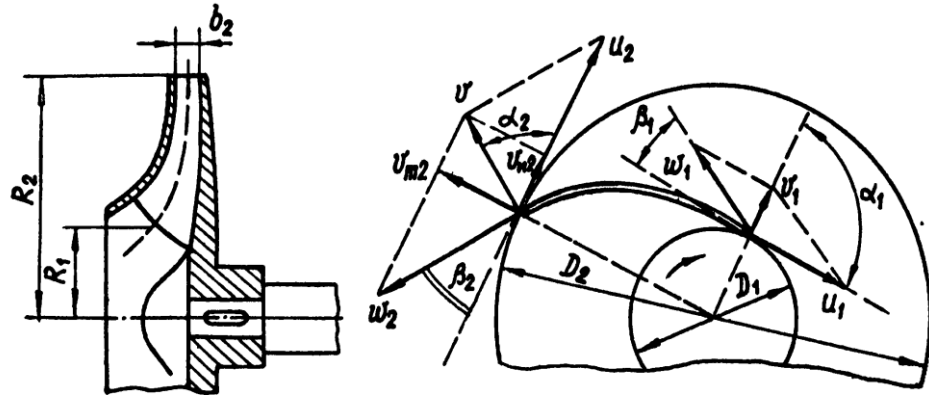


Рисунок 7.3

Використовуючи теорему про зміну моменту кількості руху і припущення, що робоче колесо має нескінченно велику кількість лопатей, товщина яких дорівнює нулю, а також про відсутність втрат потужності в нагнітачі, одержимо рівняння відцентрового насоса – формулу для визначення ідеального напору при постійній частоті обертання:

$$H = \frac{v_2 u_2 \cos \alpha_2 - v_1 u_1 \cos \alpha_1}{g}.$$

Підводи багатьох конструкцій, наприклад, прямоосний конфузom не закручують потік ($\alpha_1 = 90^\circ$). В цьому випадку

$$H = \frac{v_2 u_2 \cos \alpha_2}{g}.$$

Дійсний напір нагнітача визначається з урахуванням кінцевого числа лопатей і втрат напору

$$H = \frac{v_2 u_2 \cos \alpha_2}{g} \eta_e k,$$

де η_e – гідравлічний ККД нагнітача, k – безрозмірний коефіцієнт впливу кінцевої кількості лопаток.

Характеристику нагнітача можна одержати лише дослідним шляхом. Найбільше застосування для лопатевих нагнітачів одержали залежності напору H (тиску), потужності і ККД від подачі при незмінних густині рідини, геометричних розмірах і частоти обертання. Такого роду графік одержав назву повної характеристики нагнітача (рис. 7.4).

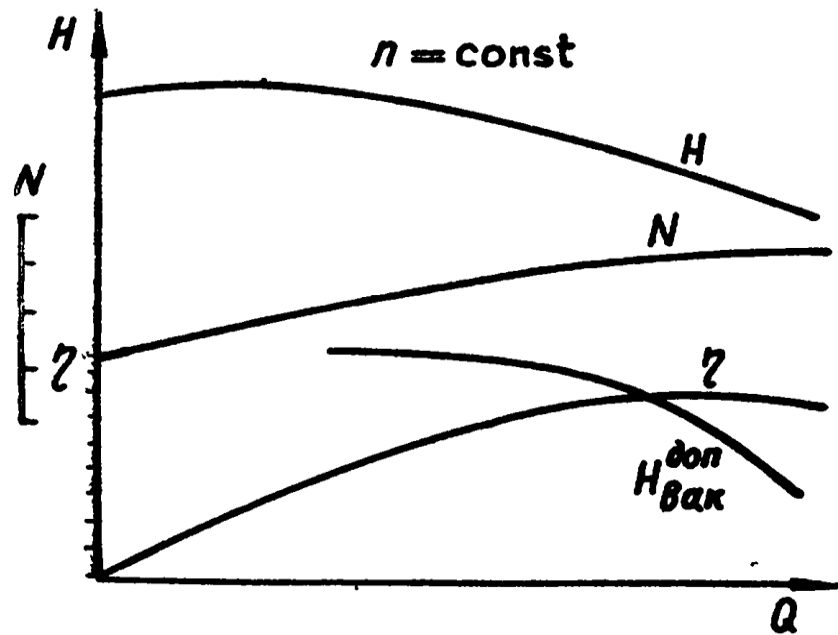


Рисунок 7.4 – Повна характеристика лопатевого нагнітача

Подібність лопатевих нагнітачів

На сьогодні рішення багатьох питань, пов'язаних з рухом рідин в проточній частині нагнітачів здійснюється дослідним шляхом. При конструюванні і виготовленні нових зразків нагнітачів незрозумілі питання відпрацьовуються на моделі. Одержані на моделі залежності переносяться потім на натурну машину за законами гідродинамічної подібності. На підставі цих законів відбувається також перерахунок характеристик нагнітача на інші частоти обертання.

Виходячи із загальних законів гідродинамічної подібності, нагнітачі можна вважати подібними, якщо буде додержана геометрична, кінематична і динамічна подібність. Відцентрові нагнітачі звичайно працюють при великих значеннях чисел Рейнольдса, тобто в області автомодельності, коли для гідродинамічної подібності достатньо лише геометричної і кінематичної подібності.

Кінематична подібність виражається в подібності паралелограмів швидкостей у будь-яких подібних точках натури і моделі (рис. 7.5), з якої витікає, що

$$\frac{v_{2н}}{v_{2м}} = \frac{w_{2н}}{w_{2м}} = \frac{v_{м2н}}{v_{м2м}} = \frac{u_{2н}}{u_{2м}} = \frac{\frac{\pi D_n n_n}{60}}{\frac{\pi D_m n_m}{60}} = \frac{D_n}{D_m} \cdot \frac{n_n}{n_m} = K_L \frac{n_n}{n_m} = const,$$

де $K_L = \frac{D_n}{D_m}$ - масштаб геометричної подібності – число, що показує, у скільки разів геометричні розміри в натурі відрізняються від відповідних розмірів у моделі; n_n і n_m – відповідно частота обертання робочого колеса в натурі і у моделі.

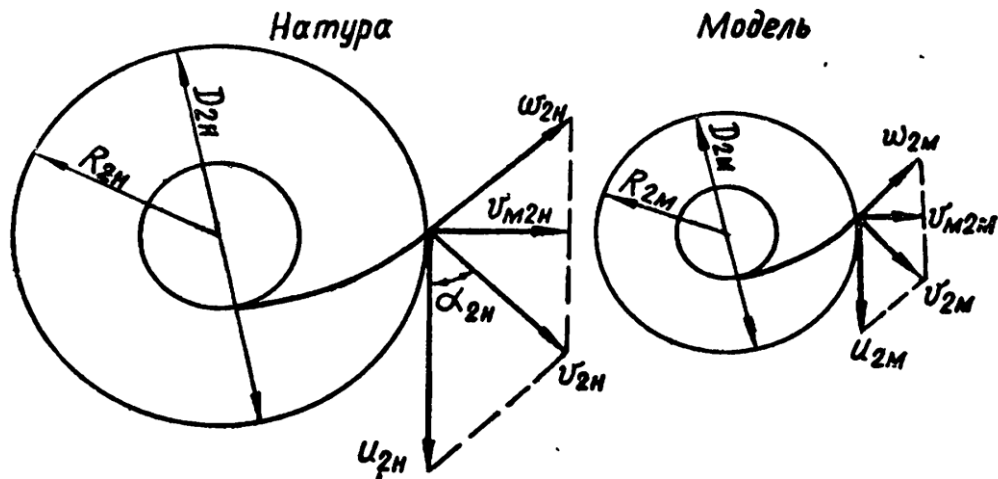


Рисунок 7.5

Для двох однакових нагнітачів ($K_L = 1$), що працюють з різною частотою обертання і перекачують рідину однакової густини, закони подібності приймають вид

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{n_1}{n_2}; \quad \frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{n_1}{n_2} \right)^2; \quad \frac{N_1}{N_2} = \left(\frac{n_1}{n_2} \right)^3.$$

Останні залежності називають законами пропорційності відцентрових нагнітачів. За ними здійснюється перерахунок робочих характеристик нагнітача на іншу частоту обертання. Розглянемо конкретний приклад. Припустимо, що робоча характеристика нагнітача при частоті обертання n_1 задана таблицею 7.1.

Таблиця 7.1

Q_1 , л/с	0	12	24	36
H_1 , м	52	54	44	19
η_1	0	0.63	0.75	0.36

Перерахуємо її на частоту обертання $n_2 = 0,9 n_1$. На підставі законів пропорційності знаходимо:

$$Q_2 = Q_1 \frac{n_2}{n_1} = 0.9 Q_1; \quad H_2 = H_1 \left(\frac{n_2}{n_1} \right)^2 = 0.81 H_1.$$

Отже, для одержання характеристики нагнітача при частоті обертання n_2 необхідно першу строку таблиці 10 помножити на 0,9, а другу – на 0,81. ККД для подібних режимів приймаються однаковими. В результаті виконання вказаних розрахунків одержимо характеристику нагнітача при частоті обертання n_2 (табл. 7.2).

Таблиця 7.2

Q_1 , л/с	0	10,8	21,6	32,4
H_1 , м	42,0	43,7	35,6	15,4
η_2	0	0.63	0.75	0.36

Припустимо задані характеристики нагнітача при частотах обертання n_1 і n_2 (рис. 7.6). Покажемо, що подібні режими, що визначаються точками 1 і 2, лежать на квадратичній параболі, що проходить через початок координат. Для цього підставимо у відношення напорів

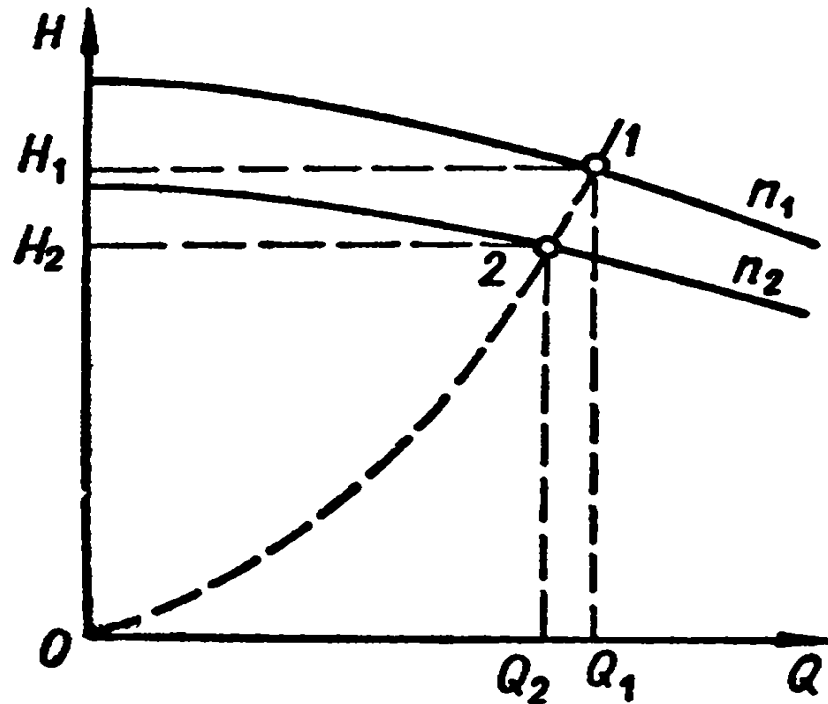


Рисунок 7.6

$$\frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{n_1}{n_2} \right)^2$$

значення $\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{n_1}{n_2}$. В результаті одержимо

$$\frac{H_1}{H_2} = \frac{Q_1^2}{Q_2^2} \quad \text{або} \quad \frac{H_1}{Q_1^2} = \frac{H_2}{Q_2^2} = \dots = \frac{H_n}{Q_n^2},$$

або

$$H = kQ^2.$$

Це і є рівняння параболи подібних режимів (штрихова лінія на рис. 7.6). Закони пропорційності вірні тільки для точок, що лежать на цій кривій.

Критерієм подібності відцентрових нагнітачів є коефіцієнт швидкохідності

$$n_s = \frac{3,65n\sqrt{Q}}{H^{3/4}}.$$

Коефіцієнт швидкохідності характеризує здатність нагнітача створювати напір і забезпечувати подачу. Чим більше n_s , тим менше напір і більше подача нагнітача.

Якщо двигун нагнітача нерегульований, а від нагнітача потрібно одержати режим роботи, що відповідає точці A^1 з координатами Q^1 і H^1 , яка не лежить на характеристиці нагнітача (рис. 7.7), то застосовують обточку робочого колеса по зовнішньому діаметру. При цьому крива $H = f(Q)$ опускається вниз і при деякому значенні діаметра D^1 пройде через задану режимну точку A^1 .

Для розрахунку характеристики нагнітача, яка буде одержана після обточки робочого колеса, застосовують емпіричні формули

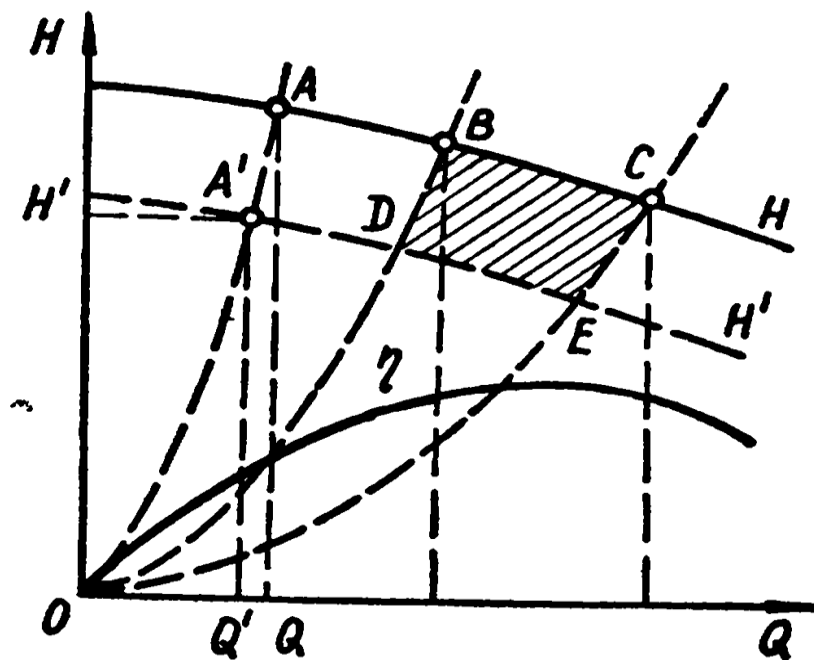


Рисунок 7.7

$$\frac{Q'}{Q} = \frac{D'}{D}; \quad \frac{H'}{H} = \left(\frac{D'}{D}\right)^2, \quad (7.1)$$

в яких D , Q і H – відповідно зовнішній діаметр, подача і напір нагнітача з не обточеним робочим колесом; D^1 , Q^1 і H^1 – те ж для нагнітача з обточеним робочим колесом.

З останніх рівнянь витікає, що

$$\frac{H'}{H} = \left(\frac{Q'}{Q}\right)^2 \quad \text{або} \quad \frac{H'}{Q'^2} = \frac{H}{Q^2} = k = \text{const};$$

$$H = kQ^2.$$

Таким чином, режими A і A^1 , що задовольняють рівнянням (7.1), лежать на квадратичній параболі, яку називають параболою обточок.

Допустима величина обточки робочого колеса вибирається в залежності від коефіцієнта швидкості нагнітача:

n_s	60	120	200	300	350	350
$\frac{D - D'}{D}$	0.20	0.15	0.11	0.09	0.07	0.00

Нагнітач доцільно експлуатувати тільки в областях високих ККД (ділянка BC на рис. 7.7). Криволінійний чотирикутник $BCED$, обмежений характеристиками нагнітача з не обточеним робочим колесом (крива $H = f(Q)$) і з максимально обточеним робочим колесом (крива $H^I = f(Q)$) і параболою обточок, що проходять через точки B і C , називають робочим полем нагнітача. Режими, що лежать в межах цього чотирикутника, є робочими.

Задача 1. Визначити потужність насоса, що перекачує воду $Q = 100$ л/с, якщо показання манометра і вакуумметра дорівнюють відповідно $p_m = 2.45 \cdot 10^5$ Па; $p_{вс} = 0.49 \cdot 10^5$ Па. Приймаємо, що $v_{вс} = v_n$ і $\eta = 0.9$.

Задача 2. Відцентровий насос з подачею 10 л/с, напором 2 м і потужністю 0,4 кВт замінили на подібний інший, але у двічі більший та з подвійною частотою обертання $n_2 = 2n_1$. Визначити, як зміниться подача, напір і споживана потужність.

Спільна робота нагнітача з мережею

Припустимо, що нагнітач подає рідину по трубопроводу заданих геометричних розмірів на висоту h_z з приймального резервуару в напірний, тиски на поверхні рідини відповідно дорівнюють p_1 і p_2 (рис. 7.8). Його напір повинен бути достатнім для підйому рідини на висоту h_z , подолання різниці тисків в резервуарах і всіх гідравлічних опорів, які залежать від швидкості руху рідини, а отже, і від витрати:

$$H_n = h_z + \frac{p_2 - p_1}{\rho g} + h_g,$$

$$h = \left(\lambda_1 \frac{l}{d_1} + \sum \zeta \right) \frac{8Q^2}{\pi^2 g d_1^4} + \left(\lambda_2 \frac{l_2}{d_2} + \sum \zeta_2 \right) \frac{8Q^2}{\pi^2 g d_2^4} = f(Q).$$

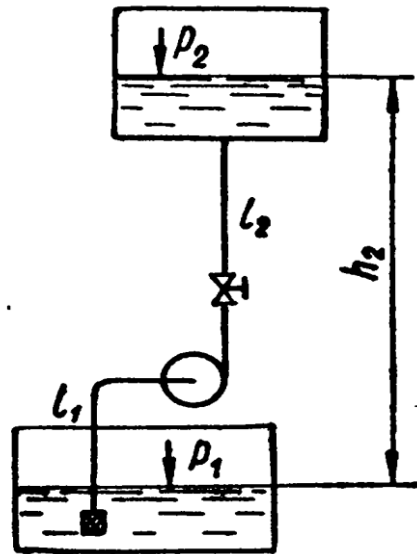


Рисунок 7.8

Залежність необхідного напору від витрати ($H_n = f(Q)$) називається характеристикою насосної установки (рис. 7.9), або характеристикою мережі, на яку працює насос.

Припустимо задані робоча характеристика насоса (рис. 7.4) і характеристика насосної установки (рис. 7.9) і потрібно визначити режим роботи насоса на заданий трубопровід. З цією метою на одному кресленні і в тому ж масштабі будують характеристику насоса і характеристику мережі. Точка A їх перетинання і визначає режим роботи насоса на заданий трубопровід (рис. 7.10). За точкою A визначають подачу Q , напір H і ККД насоса η , а потім розраховують споживану потужність $N = \rho g Q / \eta$.

Щоб змінити режим роботи насоса, необхідно змінити характеристику насосної установки (криву $H_n = f(Q)$) або характеристику насоса (криву $H = f(Q)$). На першу можна вплинути за допомогою регульованою засувки – регулювання дроселюванням. Якщо засувку прикрити, то опір трубопроводу збільшиться, і робоча точка A зміститься вліво (рис. 7.10а). Цей спосіб регулювання простий, але неекономічний.

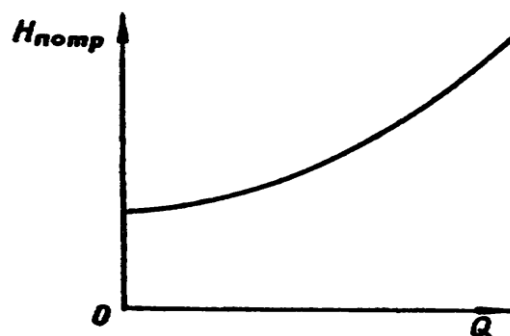


Рис. 7.9

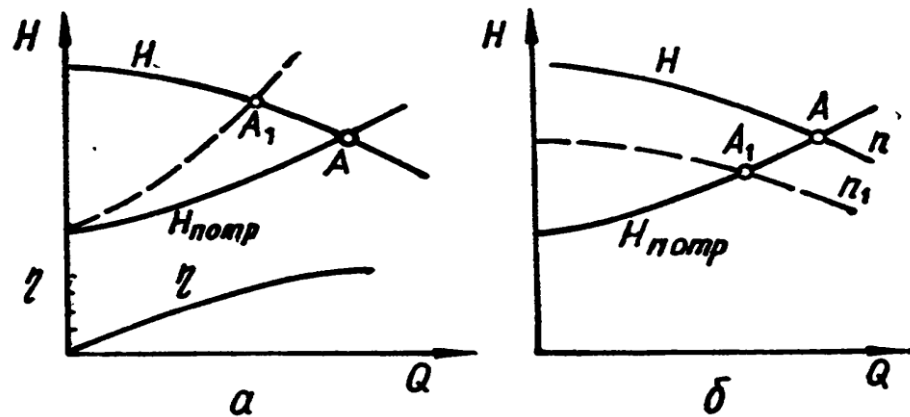


Рис. 7.10

На характеристику насоса можна вплинути, змінюючи частоту обертання вала насоса. Наприклад, при зменшенні частоти обертання характеристика насоса опуститься вниз (рис. 7.10б), робоча точка A зміститься вліво. Спосіб економічний, але необхідний привод зі змінною частотою обертання. Поруч з цими основними способами регулювання подачі насоса застосовується також перепуск рідини з напірного трубопроводу до всмоктувального.

Для підвищення напору застосовують послідовне з'єднання насосів (рис. 7.11). Сумарна характеристика двох насосів в цьому випадку будується шляхом складання ординат кривих $H_1 = f(Q)$ і $H_2 = f(Q)$ при однаковому значенні подачі.

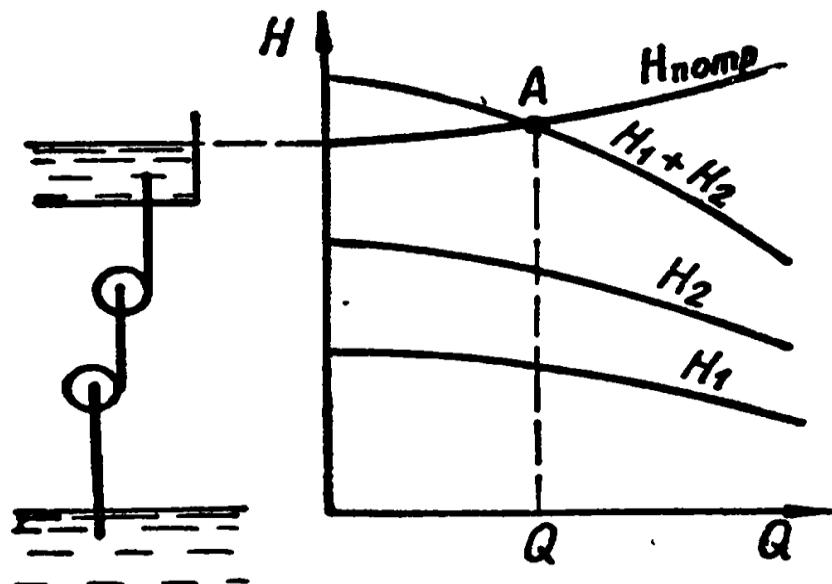


Рис. 7.11

Для збільшення витрати застосовують паралельне з'єднання насосів (рис. 7.12). Сумарна характеристика двох насосів будується складанням абсцис кривих $H_1 = f(Q)$ і $H_2 = f(Q)$ при однаковому значенні напору.

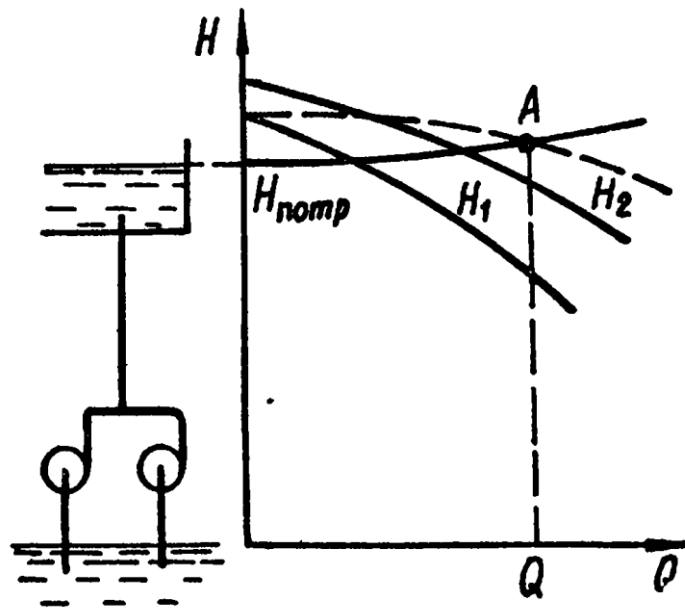


Рис. 7.12

Задача 1. Відома характеристика насоса (рис. 7.13). Він повинен подавати воду по трубопроводу довжиною 500 м, діаметром 150 мм. Трубопровід в кінці має позначку над рівнем води в резервуарі живлення $H_{\lambda} = 20$ м і вільний напір $h_e = 10$ м. Гідравлічний коефіцієнт тертя $\lambda = 0,03$; місцеві опори до уваги не приймати. Визначити робочу точку насоса, відповідну їй подачу Q і потужність на валу N .

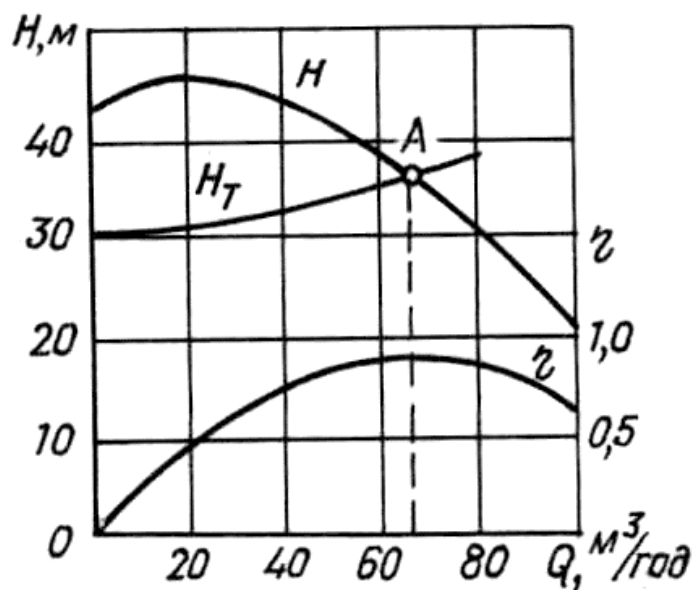


Рис. 7.13. До задачі 1

Задача 2. Визначити подачу відцентрового насоса і потужність, яку він споживає при $n = 3000 \text{ хв}^{-1}$, якщо насос подає воду шлангами $l_1 = 6 \text{ м}$; $d_1 = 100 \text{ мм}$ ($\lambda_1 = 0,025$; $\zeta_1 = 4$) і $l_2 = 40 \text{ м}$; $d_2 = 90 \text{ мм}$ ($\lambda_2 = 0,035$; $\zeta_2 = 10$) через конфуз орний насадок $d = 40 \text{ мм}$ ($\zeta = 0,08$; $\varepsilon = 1$) на висоту $h = 16 \text{ м}$. Характеристика насоса дається в таблиці 7.3.

Таблиця 7.3.

$Q, \text{ л/с}$	0	5	10	15	20	25	30	35
$H, \text{ м}$	140	140	136	130	121	110	98	83
η	0	0,34	0,55	0,68	0,75	0,77	0,73	0,65

Задача 3. Радіальний вентилятор з характеристикою, зображеною на рис. 7.13, працює на мережу, опір якої описується залежністю $p_n = 400 + 54 \cdot 10^{-6} Q^2$, де p_n – потрібний тиск у Па, а Q – витрата у $\text{м}^3/\text{год}$. Визначити продуктивність, тиск, ККД і споживану потужність вентилятора при кутовій швидкості колеса $\omega = 250 \text{ с}^{-1}$.

Питання для контролю знань

1. Що називають нагнітачами?
2. За якими ознаками класифікують нагнітачі?
3. Які основні параметри характеризують роботу нагнітачів?
4. Що називають теоретичними характеристиками відцентрового насосу?
5. Які існують три типа лопаток робочого колеса? Поясніть відмінність в їх теоретичних характеристиках.
6. Коефіцієнт корисної дії відцентрового насоса. Які три види втрат енергії існують в нагнітачах?
7. Як визначаються справжні характеристики відцентрового нагнітача?
8. Що називають робочою точкою? Як пов'язане з нею питання вибору нагнітача для даної мережі?
9. Що називають полем робочих характеристик насоса або вентилятора?
10. Запишіть формули подібності для подібних режимів одного насоса.
11. Як перерахувати характеристики нагнітача від одного режиму роботи до іншого?
12. Що називають коефіцієнтом швидкохідності? Як класифікують робочі колеса за коефіцієнтом швидкохідності?
13. Обґрунтуйте необхідність застосування послідовного з'єднання нагнітачів.
14. Чому необхідно застосовувати паралельне з'єднання нагнітачів?

Список використаної літератури

1. Дейч М.Е., Зарянкин А.Е.. Гидрогазодинамика. Учебное пособие для вузов. - М.: Энергоатомиздат, 1984.-384с.
2. Технічна гідромеханіка. Гідравліка та гідропневмопривод: підручник /В.О. Федорець, М.Н.Педченко та ін. За ред. В.О. Федорця.- Житомир:ЖІТІ, 1998.- 412 с.
3. Гидравлика, гидромашины и гидроприводы /Т.М. Башта, С.С.Руднев, Б.В.Некрасов и др.- М.: Машиностроение, 1982.- 423 с.
4. Мандрус В.І, Лещій Н.П., Звягін В.М. Машинобудівна гідравліка. Задачі та приклади розрахунків – Львів: Світ, 1995 – 264 с.
5. Задачник по гидравлике, гидромашинам и гидроприводу: Учебное пособие для машиностроит. спец. вузов/ Б.Б. Некрасов, И.В. Фатеев, Ю.А. Беленков и др. – М.: Высш. шк, 1989.- 192 с.
6. Сипайлов Г.А. и др. Тепловые, гидравлические и аэродинамические расчеты в электрических системах.- М.: Высш.шк.,1989.-239 с.

Додаток А

Деякі фізичні властивості рідин при тиску 0,1 МПа

Рідина			Темпера- тура, °С	Густина, кг/м ³	Питома вага, Н/м ³	В'язкість 10 ⁴ ,м ² /с	
Бензин	авіаційний		20	739-780	7250-7652	0,49 для 20 °С	
	автомобільний			712-761	6980-7470		
Масло	веретенне АУ (ГОСТ 1642-75)		50	888-896	8711-8790		
	для гідравлічних систем АМГ-30 (ГОСТ 6794-75)			850	8340		
	індустріальне загального призначення (ГОСТ 20799-75)	И-5А		890	8731	0,04-0,06	
		И-8А		900	8829	0,06-0,08	
		И-12А		880	8633	0,10-0,14	
		И-20А		885	8682	-	
		И-25А		890	8731	0,24-0,27	
		И-30А		890	8731	0,28-0,33	
		И-40А		895	8780	0,35-0,45	
		И--100А		920	9025	0,90-1,18	
	солярове			20	885-902	8680-8850	
	трансформаторне			50	886	8692	
	турбінне (ГОСТ 32-74)	22			900	8829	
		30	900		8829	0,28-0,36	
		46	900		8829	0,44-0,48	

Додаток Б

Кінематична в'язкість масел при різних температурах

Масло		10 ⁴ , м ² /с при °С					
		100	50	10	0	-5	-10
веретенне АУ (ГОСТ 1642-75)		0,036	0,13	0,90	1,80	2,80	4,40
для гідравлічних систем АМГ-30 (ГОСТ 6794-75)		0,047	0,11	0,30	0,44	0,54	0,67
індустріальне (ГОСТ 20799-75)	И-20	0,048	0,18	1,13	2,75	4,20	6,40
	И-45	0,081	0,42	5,01	11,90	19,50	59,90
	И-50 (машинне СУ)	0,085	0,50	8,33	22,90	41,70	83,80
трансформаторне с присадкою іонол		0,030	0,09	0,05	0,89	1,24	1,77
турбінне (ГОСТ 32-74; 9972-74)	ТП-22	0,060	0,22	2,13	4,76	7,73	9,10
	ТП-22 (з сірчистих нафт)	0,050	0,21	1,72	3,75	5,68	25,30
	ТП-30УТ	0,060	0,42	3,59	8,63	14,40	33,10

Додаток В

Динамічна в'язкість масел при різних температурах

Рідина	°С	10 ⁻¹ Па*с при тиску МПа					
		0,1	10	20	30	40	50
Автол	37	1,440	1,940	2,450	3,030	3,672	4,896
Машинне	22	2,880	3,416	4,176	5,184	6,822	8,640
Трансформаторне	22	0,346	0,374	0,418	0,489	0,562	0,650