

Міністерство освіти і науки України
Державний університет «Одеська політехніка»
Кафедра прикладної екології та гідрогазодинаміки

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
ДО ВИКОНАННЯ
КУРСОВИХ РОБІТ ЗА ДИСЦИПЛІНОЮ
«ГІДРОГАЗОДИНАМІКА»**
для здобувачів рівня бакалавр спеціальностей 143 Атомна енергетика і
144 Теплоенергетика

Одеса - 2022

Міністерство освіти і науки України
Державний університет «Одеська політехніка»
Кафедра прикладної екології та гідрогазодинаміки

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
ДО ВИКОНАННЯ
КУРСОВИХ РОБІТ ЗА ДИСЦИПЛІНОЮ
«ГІДРОГАЗОДИНАМІКА»**
для здобувачів рівня бакалавр спеціальностей 143 Атомна енергетика і
144 Теплоенергетика

Затверджено на засіданні кафедри
прикладної екології та гідрогазодинаміки
Протокол № 3 від 26.10.2021 р.

Одеса – 2022

Методичні вказівки до виконання курсових робіт з дисципліни "Гідрогазодинаміка" для здобувачів вищої освіти за спеціальністю 143 Атомна енергетика, 144 Теплоенергетика / Укл. С.В. Сурков, О.Г. Бутенко – Одеса: Національний університет «Одеська політехніка», 2022. – 24с.

Укладачі:

Сурков С.В., доцент

Бутенко О.Г., доцент

ЗМІСТ

1	Теоретичний вступ	4
1.1	Гідростатика	4
1.1.2	Абсолютний та надлишковий тиск	4
1.1.3	Визначення сил гідростатичного тиску, що діють на тверді стінки	5
1.2	Рух рідини у трубопроводах	6
1.2.1	Витрата та середня (середньовитратна) швидкість	6
1.2.2	Втрати напору у трубах	6
1.2.3	Досліди Рейнольдса. Ламінарний та турбулентний режими течії	7
1.2.4	Досліди Нікурадзе. Графік Нікурадзе	8
1.2.5	Основні області гідравлічного тертя	9
1.3	Газова динаміка.....	10
1.3.1	Рівняння газового стану	10
1.3.2	Адіабатне витікання газу через сопло що звужується	11
1.4	Приклади запитань до підсумкового контролю.....	13
2	Завдання на курсову роботу	14
3	Вказівки щодо оформлення курсової роботи	16
4	Приклад виконання курсової роботи	17
	Додаток 1. Густина води в залежності від температури	23
	Додаток 2. Варіанти вихідних даних	23

1 Теоретичний вступ

Навчальна дисципліна «Гідрогазодинаміка» є важливим елементом фахової підготовки енергетиків. Знання законів руху і рівноваги рідин і газів необхідне для розуміння технологій, що використовуються у енергетичній галузі.

Метою курсової роботи є застосування теоретичних знань з дисципліни для вирішення практичних питань розрахунку та проектування гідравлічних систем.

Тема курсової роботи – гідростатичний, гідродинамічний і газодинамічний розрахунок комбінованої гідравлічної системи.

Завдання для КР є індивідуальним і видаються на першому тижні занять. Захист відбувається усно не пізніше останнього навчального тижня семестру.

1.1 Гідростатика

Гідростатика вивчає рідини та гази у стані рівноваги та їх взаємодію з твердими стінками.

Тиск у вибраній точці нерухомої рідини можна розрахувати за основним рівнянням гідростатики:

$$p = p_0 + \rho gh$$

де p – тиск у вибраній точці рідини, Па;

p_0 – тиск на поверхні рідини, Па;

ρ – густина рідини, кг/м^3 ;

g – прискорення вільного падіння, м/с^2 ;

h – глибина вибраної точки, м.

1.1.2 Абсолютний та надлишковий тиск

У шкалі абсолютних тисків за нуль приймається повний вакуум. Ця шкала зображена ліворуч на рис. 1.

Повний вакуум – це гіпотетичне середовище, в якому відсутні молекули, атоми та будь-які матеріальні частинки.

У шкалі абсолютних тисків стандартний атмосферний тиск дорівнює 101325 Па. Реальний атмосферний тиск $p_{\text{бар}}$ завжди відрізняється від стандартного, його вимірюють барометром.

У шкалі надлишкових тисків за нуль приймається атмосферний тиск. Ця шкала показана праворуч на рис.1. Повному вакууму в шкалі надлишкових тисків відповідає негативний тиск, що дорівнює -101325 Па.

Позитивний надлишковий тиск p_m вимірюється манометром.

Негативний надлишковий тиск називається розрідженням або вакуумом. Вимірюється вакуумметром та позначається $p_{\text{вак}}$.

Абсолютний тиск можна виразити через показання приладів за допомогою наступних формул:

$p_{\text{абс}} = p_{\text{бар}} + p_m$, якщо тиск у досліджуваній точці вищий за атмосферний;

$p_{\text{абс}} = p_{\text{бар}} - p_{\text{вак}}$, якщо тиск у досліджуваній точці нижче атмосферного.

У багатьох технічних і побутових завданнях зручно користуватися шкалою надлишкових тисків, оскільки для цього не потрібно знати показання барометра. Але, наприклад, в усіх законах газової динаміки фігурує тільки абсолютний тиск. У таблицях

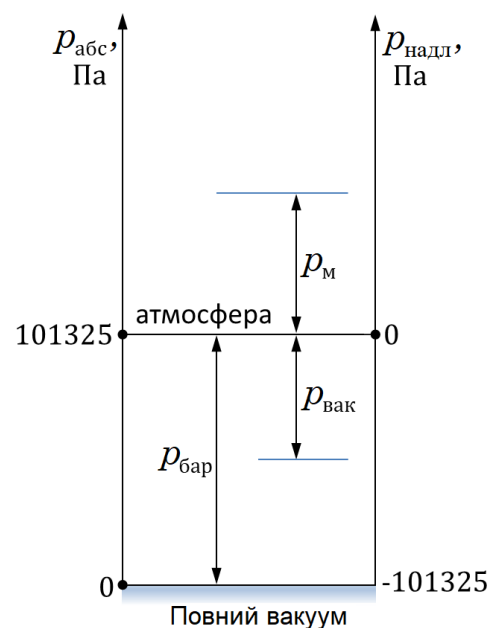


Рис. 1

термодинамічних властивостей води та водяної пари, які життєво важливі для енергетиків, також використовуються тільки абсолютні тиски.

Перш ніж вирішувати будь-яку задачу, пов'язану з тиском, потрібно вибрати єдину шкалу тисків для усіх точок.

1.1.3 Визначення сил гідростатичного тиску, що діють на тверді стінки

Сила гідростатичного тиску, що діє на плоску стінку, дорівнює площі стінки, помножену на тиск у центрі мас цієї стінки:

$$F = p_c A$$

Дано визначення циліндричної поверхні через її побудову.

Виберемо вертикальну базову площину. У цій площині проведемо довільну криву (не обов'язково коло). Через кожну точку цієї кривої проведемо пряму, перпендикулярну до базової площини. Отриману поверхню будемо називати циліндричною.

Силу гідростатичного тиску, що діє на циліндричну стінку, розраховують за теоремою Піфагора, попередньо визначивши вертикальну та горизонтальну складові цієї сили:

$$F = \sqrt{F_{\text{гор}}^2 + F_{\text{верт}}^2}$$

Вертикальна складова сили гідростатичного тиску, що діє на циліндричну стінку, дорівнює вазі рідини, що міститься в тілі тиску:

$$F_{\text{верт}} = \rho g V_{\text{т.т.}}$$

Тіло тиску – це уявне тіло, обмежене:

- знизу – досліджуваної циліндричною стінкою;
- зверху - вільною поверхнею рідини або її продовженням;
- збоку - вертикальними утворюючими, проведеними по зовнішньому контуру стінки, яка досліджується.

На рис. 2 показаний приклад побудови тіла тиску над циліндричною кришкою. Тіло тиску зафарбоване блакитним кольором. Вільна поверхня знаходиться у п'єзометричній трубці, і тому верхня межа тіла тиску – це продовження вільної поверхні.

Горизонтальна складова сили гідростатичного тиску, що діє на циліндричну стінку, дорівнює площі проекції стінки на вертикальну площину, помножену на тиск у центрі мас цієї проекції:

$$F = p_c A_{\text{верт}}$$

Звернемо увагу, що вертикальна площина має бути перпендикулярна до вищезгаданої базової площини.

На рис. 3 показаний принцип побудови проекції циліндричної стінки на вертикальну площину. Тут блакитним кольором виділена циліндрична стінка, що досліджується, а рожевим – проекція цієї стінки на вертикальну площину. Розмір h_c показує глибину центру мас проекції щодо вільної поверхні рідини чи її продовження.

Точка прикладання сили гідростатичного тиску називається центром тиску. На рис. 2 центр

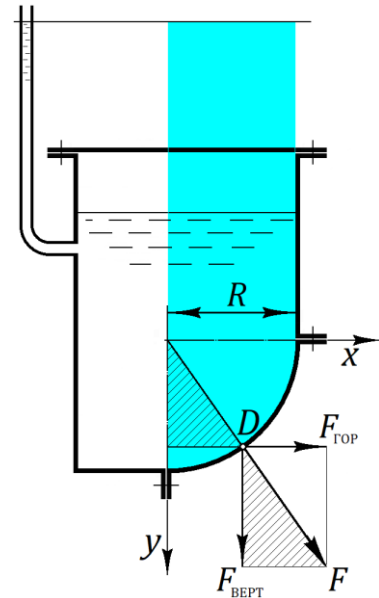


Рис. 2

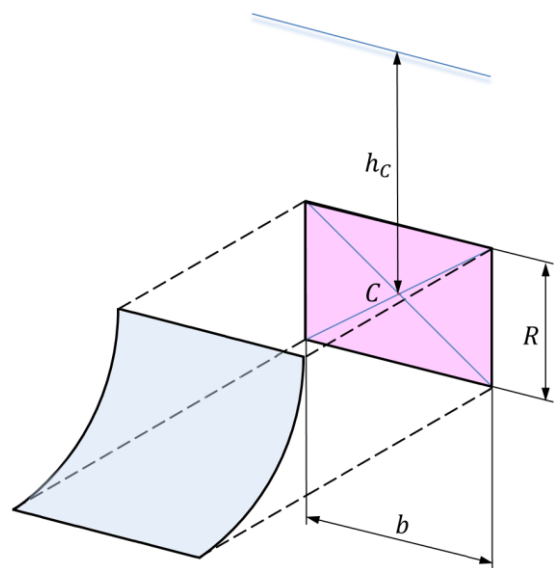


Рис. 3

тиску позначений буквою D . Для знаходження координат центру тиску поверхні кругового циліндра слід врахувати, що у кожному елементі цієї поверхні елементарна сила проходить через вісь циліндра. Отже, і сума цих сил має проходити через вісь циліндра. З цього випливає подібність заштрихованих трикутників на рис. 2.

Отже, у системі координат, показаній на рис. 2, координати центру тиску можна розрахувати за формулами $x_D = \frac{RF_{\text{гор}}}{F}$ і $y_D = \frac{RF_{\text{верт}}}{F}$.

1.2 Рух рідини у трубопроводах

1.2.1 Витрата та середня (середньовитратна) швидкість

Витрата – це кількість рідини, що проходить через вибраний переріз потоку за одиницю часу. Як «кількість» можна розглядати об'єм рідини V , що протікає, або її масу m .

$$\text{Об'ємна витрата } Q = \frac{V}{t} \text{ [м}^3\text{/с];}$$

$$\text{Масова витрата } Q = \frac{m}{t} \text{ [кг/с].}$$

$$\text{Зв'язок між ними: } Q_m = \rho Q.$$

Швидкості рідини у каналах та трубах розподілені нерівномірно. На твердих стінках швидкість рідини завжди обертається на нуль (закон прилипання). У центральній частині потоку швидкості максимальні (рис. 4).

У ряді технічних завдань можна не розглядати реальний розподіл швидкостей $u(y)$, а використовувати в розрахунках середню (середньовитратну) швидкість:

$$v = \frac{Q}{A}$$

де Q – об'ємна витрата (м³/с);

A – площа поперечного перерізу (м²).

Тоді $Q = vA$; $Q_m = \rho vA$.

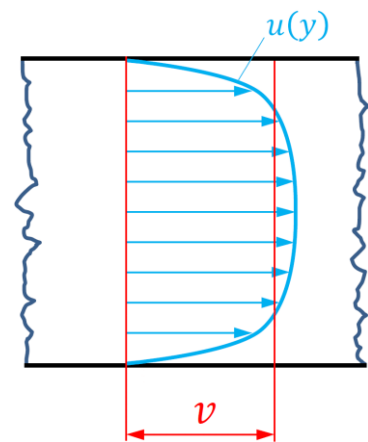


Рис. 4

1.2.2 Втрати напору у трубах

При русі в'язкої рідини в трубах частина механічної енергії потоку перетворюється на теплову. Говорять, що виникають втрати енергії (напору, тиску).

Розрізняють місцеві втрати та втрати по довжині труби.

Місцеві втрати виникають у так званих місцевих гідравлічних опорах, тобто на ділянках трубопроводу, де швидкість рідини різко змінюється за величиною або напрямом.

Приклади місцевих гідравлічних опорів:

- раптові звуження та розширення труби;
- повороти;
- регулююча арматура;
- витратомірні пристрої.

Втрати по довжині труби виникають на прямих ділянках трубопроводу постійного поперечного перерізу під дією в'язкого сил тертя. Тертя виникає внаслідок нерівномірного розподілу швидкостей (див. рис. 4).

Кожен з цих двох видів втрат може бути представлений у трьох формах: формі енергій, напорів та тисків.

Основні формули для розрахунку втрат у трубопроводах

Втрати	Місцеві втрати	Втрати по довжині труби
У формі енергій	$\Delta e_m = \zeta \frac{v^2}{2}$	$\Delta e_d = \frac{\lambda l v^2}{d 2}$
У формі напорів	$\Delta h_m = \zeta \frac{v^2}{2g}$	$\Delta h_d = \frac{\lambda l v^2}{d 2g}$
У формі тисків	$\Delta p_m = \zeta \frac{\rho v^2}{2}$	$\Delta p_d = \frac{\lambda l \rho v^2}{d 2}$

У цих формулах:

v – середня (середньовитратна) швидкість рідини (м/с);

g – прискорення вільного падіння (м/с²);

ρ – густина рідини (кг/м³);

l – довжина труби (м);

d – діаметр труби (м);

ζ – коефіцієнт (місцевих) втрат.

Величина ζ залежить від форми місцевого опору та від числа Рейнольдса

$$Re = \frac{vd}{\nu}$$

де ν – кінематична в'язкість рідини (м²/с).

λ – гідравлічний коефіцієнт тертя (коефіцієнт Дарсі);

λ залежить від числа Рейнольдса і від відносної шорсткості стін труби:

$$\lambda = f\left(Re, \frac{k}{d}\right) \quad (1)$$

де k – висота виступів шорсткості (м);

d – діаметр труби (м);

$\frac{k}{d}$ – відносна шорсткості стін труби.

Вигляд залежності (1) був отриманий Л.Прандтлем теоретично. Однак для того, щоб отримати формули для розрахунку λ , були потрібні багаторічні дослідження, головним чином експериментальні.

1.2.3 Досліди Рейнольдса. Ламінарний та турбулентний режими течії

Рейнольдс проводив досліди течії рідини у скляних трубах. Вводячи в потік води чорнила, він отримував наочну картину течії рідини. На рис. 5 представлені фотографії, отримані на сучасній установці, що повторює дослід Рейнольдса.

Рейнольдс експериментально виявив два режими течії рідини.

Ламінарний режим течії – рідина рухається паралельними шарами, без перемішування шарів, без пульсацій тиску та швидкості, без утворення дискретних вихорів.

Турбулентний режим течії – течія рідини бурхлива, з перемішуванням шарів, з пульсаціями тиску та швидкості, з утворенням дискретних вихорів.

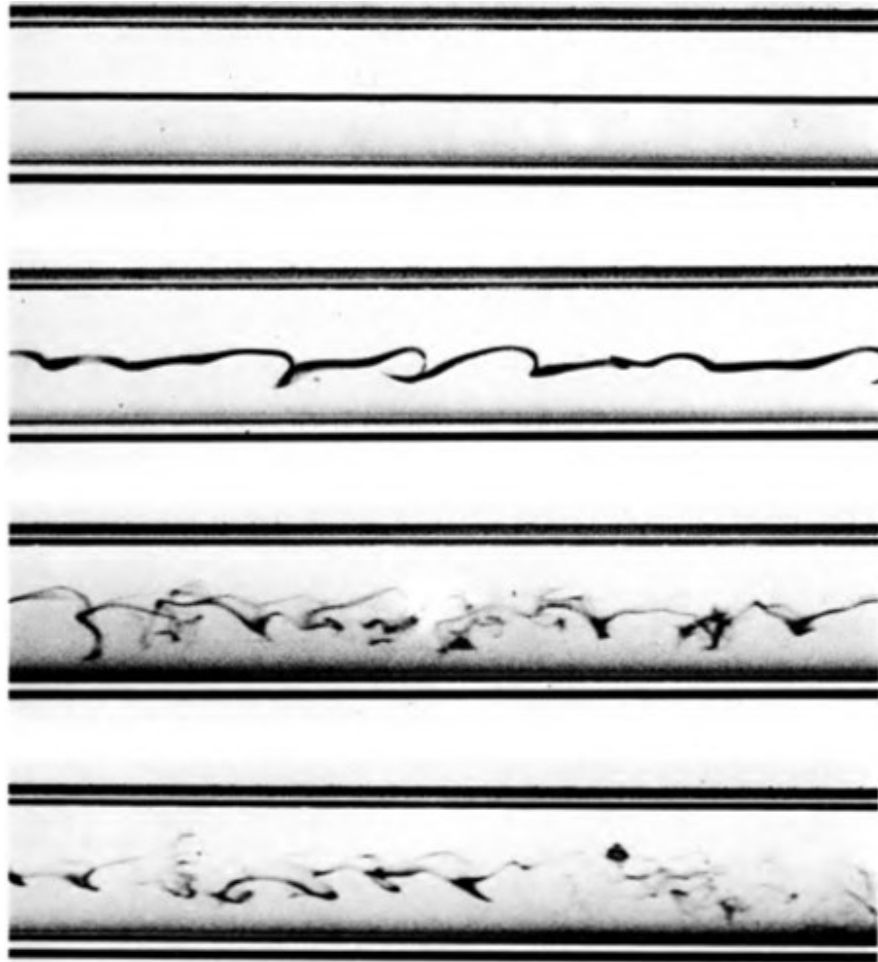


Рис. 5

1.2.4 Досліди Нікурадзе. Графік Нікурадзе

Л.Прандтль теоретично показав, що гідравлічний коефіцієнт тертя повинен залежати від числа Рейнольдса та відносної шорсткості стінок труби:

$$\lambda = f\left(Re, \frac{k}{d}\right)$$

Проблема у тому, що у технічних трубах всі виступи шорсткості мають різну висоту.

Нікурадзе проводив досліди на трубах зі штучною рівнозернистою шорсткістю.

На першому етапі він вибрав родовище піску, де піщинки були майже ідеальною сферичною формою. Далі він обклеїв внутрішню поверхню труб сферичними піщинками певного розміру. Кожен досвід Нікурадзе повторював кілька разів і виконував статистичну обробку результатів. Досліди Нікурадзе досі вважаються еталоном точності.

За результатами дослідів було побудовано знаменитий графік Нікурадзе (рис. 6).

З графіка Нікурадзе видно, що є різні області гідравлічного тертя. Для кожної області є відповідні розрахункові формули.

У технічних трубах виступи шорсткості мають різний розмір, які розташування носить випадковий характер. Для розрахунку труб із технічною шорсткістю вводять поняття еквівалентної шорсткості (позначається k_e). Значення k_e для різних типів труб наводяться у довідниках.

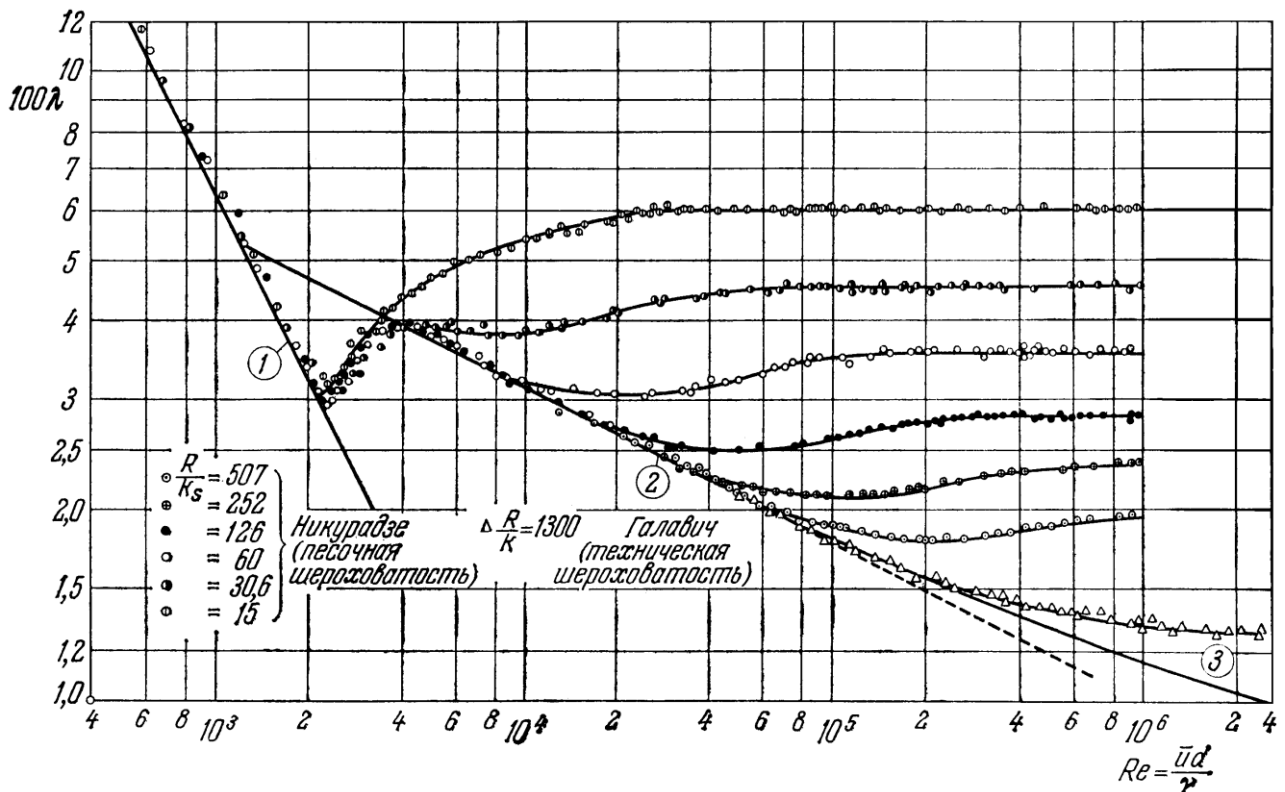


Рис. 6

1.2.5 Основні області гідравлічного тертя.

1 – ламінарний режим течії. Межі області: $Re < 2300$.

Розрахункова формула: $\lambda = \frac{64}{Re}$ (формула Пуазейля-Хагена).

На графіку Нікурадзе цій області відповідає похила пряма у лівій частині. Ця ділянка має вигляд прямої оскільки графік Нікурадзе побудований у логарифмічних координатах, а залежність між логарифмами λ та Re є лінійною:

$$\lg \lambda = \lg 64 - \lg Re.$$

2 – перехідна область від ламінарного режиму течії до турбулентного, $2300 < Re < 4000$. Це область турбулентності, що перемежується, течія тут нестійка. Якщо в роботі розрахункова точка потрапить в цю область, рекомендується прийняти значення $\lambda = 0,034$.

Області 3–5 – це турбулентний режим течії.

3 – область гідравлічно гладких труб. Межі області: $4000 < Re < 10 \frac{d}{k_e}$.

Розрахункова формула: $\lambda = \frac{0,3164}{Re^{0,25}}$ (формула Блазіуса).

Ця область представлена на графіку Нікурадзе у вигляді похилої прямої, яка є більш пологою, ніж в області 1. У логарифмічних координатах залежність знову лінійна:

$$\lg \lambda = \lg 0,3164 - 0,25 \cdot \lg Re.$$

4 – перехідна область від гідравлічно гладких труб до шорстких.

Межі області: $10 \frac{d}{k_e} < Re < 500 \frac{d}{k_e}$.

Розрахункова формула: $\lambda = 0,11 \cdot \left(\frac{68}{Re} + \frac{k_e}{d} \right)^{0,25}$ (формула Альтшуля).

5 – область шорстких труб. Межі області: $Re > 500 \frac{d}{k_e}$.

Розрахункова формула: $\lambda = 0,11 \left(\frac{k_e}{d} \right)^{0,25}$ – формула Шифрінсона.

У цій області коефіцієнт Дарсі λ перестав залежати від Re , а графіки набули вигляду горизонтальних прямих. Кажуть, що настала автотодельність за числом Рейнольдса. Тому одна з назв області 5 – автотодельна.

Слід зазначити, що формула Альтшуля є універсальною, і її можна використовувати для турбулентного режиму течії (області 3–5).

За наявності у трубопроводі кількох місцевих опорів та втрат за довжиною всі ці втрати сумуються:

$$\Delta p = \left(\frac{\lambda l}{d} + \sum \zeta_i \right) \frac{\rho v^2}{2}$$

1.3 Газова динаміка

Газова динаміка вивчає рух газів з урахуванням їхньої стисливості.

Знехтувати стисливістю газів можна лише при малих дозвукових швидкостях, тобто, при числах Маха $M < 0,2$.

Безрозмірне число Маха визначається як

$$M = \frac{u}{c}$$

де u – швидкість потоку газу, м/с;

c – місцева швидкість звуку, м/с.

На відміну від нестисливої рідини, при розрахунку течій газу необхідно враховувати характер термодинамічного процесу. У більшості технічних завдань можна вважати, що течія газу відбувається без теплообміну з навколишнім середовищем, тобто процес адіабатний.

Рівняння адіабатного процесу:

$$\frac{p}{\rho^k} = \text{const},$$

де k – показник адіабати,

$$k = \frac{c_p}{c_v}$$

де c_p – питома теплоємність газу за постійного тиску, Дж/(кг·К);

c_v – питома теплоємність газу при постійному об'ємі, Дж/(кг·К).

Зокрема, для повітря $k = 1,4$.

1.3.1 Рівняння газового стану

Зв'язує між собою параметри ідеального газу.

$$pV = \frac{m}{\mu} R_{\text{унів}} T$$

де p – тиск газу, Па;

V – об'єм газу, м³;

m – маса газу, кг;

μ – молекулярна маса газу; для повітря $\mu = 28,97$ г/моль;

$R_{\text{унів}}$ – універсальна газова постійна, $R_{\text{унів}} = 8314$ Дж/(кг·К);

T – абсолютна термодинамічна температура, К.

Але $\frac{m}{V} = \rho$ – густина газу, кг/м³;

$\frac{R_{\text{унив}}}{\mu} = R$ – питома газова постійна, Дж/(кг·К).

Наприклад, для повітря $R = \frac{8314}{28,97} = 287$ Дж/(кг·К).

Тоді рівняння газового стану набуває вигляду

$$\frac{p}{\rho} = RT$$

Визначені вище величини дозволяють розрахувати швидкість звуку в потоці газу:

$$c = \sqrt{kRT}$$

1.3.2 Адіабатне витікання газу через сопло, що звужується

Схема такого витікання представлена на рис. 8. Усередині бака газ нерухомий. Параметри нерухомого газу називають параметрами гальмування. У формулах вони позначаються зірочкою.

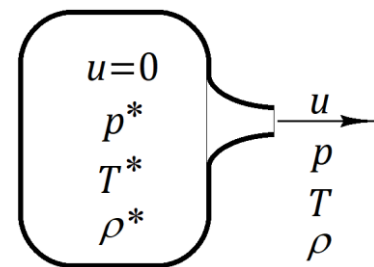


Рис. 8

Оскільки тиск усередині бака p^* більше, ніж тиск зовні p , газ витікає назовні через сопло зі швидкістю u .

Відношення тисків позначимо

$$\beta = \frac{p}{p^*}.$$

Відношення тисків, при якому швидкість газу на виході з сопла досягає швидкості звуку, називається критичним. Воно дорівнює

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

Зокрема, для повітря $\beta_{\text{кр}} = 0,5283$.

Масова витрата повітря, яке адіабатно витікає через сопло, що звужується, розраховують за формулою Сен-Венана – Ванцеля:

$$Q_m = A_c \sqrt{\frac{2k}{k-1} p^* \rho^* \left(\beta^{\frac{2}{k}} - \beta^{\frac{k+1}{k}} \right)} \quad (22)$$

На рис. 9 масова витрата показана як функція від β . Тобто показано, як змінюється масова витрата, якщо параметри гальмування в баку залишаються незмінними, а зовнішній тиск зменшується. Масова витрата, розрахована за (22), показана кривою ABC .

Як видно з рис. 9, при зменшенні β від 1 до $\beta_{\text{кр}}$ масова витрата збільшується, що узгоджується із нашою фізичною інтуїцією. Однак при подальшому зменшенні β від $\beta_{\text{кр}}$ до 0 масова витрата має зменшитися до 0, що здається неможливим.

Експеримент показує, що в області $\beta < \beta_{\text{кр}}$ швидкість газу залишається рівною швидкості звуку, а масова витрата залишається постійною. Тобто реальна зміна масової

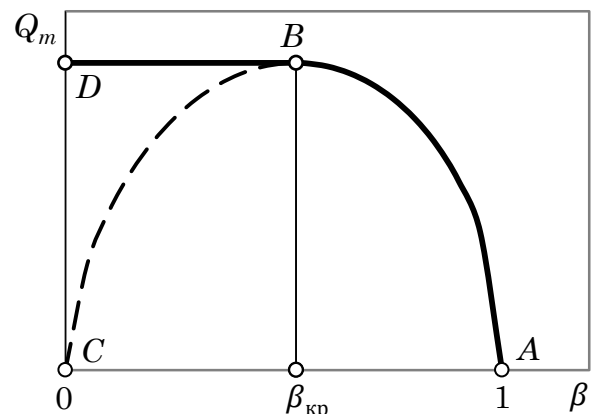


Рис. 9

витрати відбувається не по лінії ABC , а по лінії ABD .

Явище, коли незважаючи на зменшення відношення тисків масова витрата залишається постійною, називають «замиканням сопла».

Для зручності розрахунку формулу Сен-Венана-Ванцеля можна записати у вигляді

$$Q_m = \mu A_c B \sqrt{p^* \rho^*}. \quad (22)$$

Якщо $\beta > \beta_{кр}$, то витікання дозвукове, і параметр B розраховують за формулою

$$B = \sqrt{\frac{2k}{k-1} \left(\beta^{\frac{2}{k}} - \beta^{\frac{k+1}{k}} \right)}. \quad (20)$$

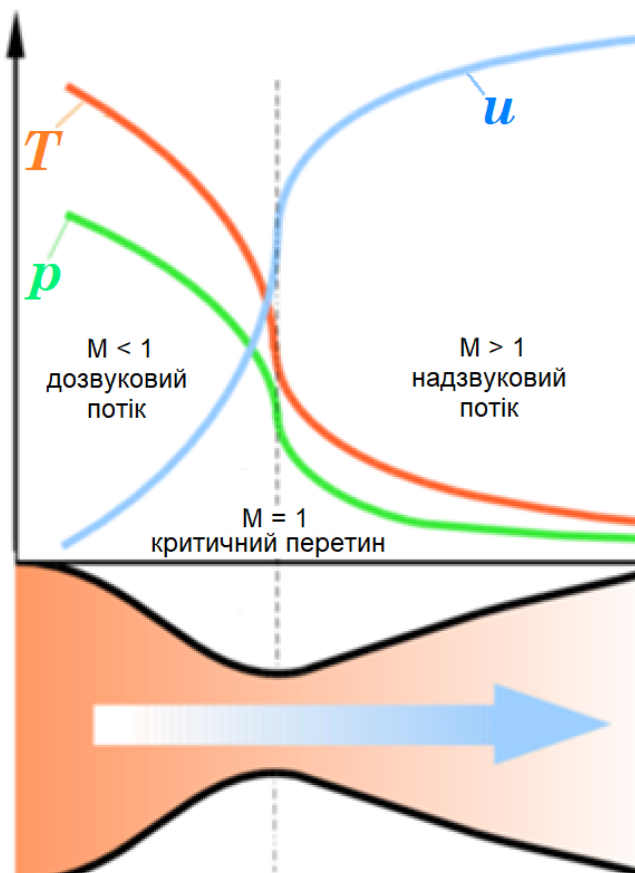
Якщо $\beta \leq \beta_{кр}$, то витікання відбувається в критичному режимі, і параметр B обчислюють за формулою

$$B = \sqrt{k \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}}}. \quad (21)$$

Для повітря це значення $B = 0,68473$.

Для того, щоб розігнати потік газу до надзвукових швидкостей, необхідно використовувати сопло Лавала, яке складається із ділянки що звужується (конфузорної) і ділянки що розходить (дифузорної).

Вздовж сопла температура та тиск газу зменшуються, а швидкість збільшується (рис. 9).



Найвужчий перетин сопла називається критичним. Там швидкість потоку дорівнює швидкості звуку, отже $M = 1$.

1.4 Приклади запитань до контролю

1. Поясніть, який тиск називається абсолютним? За допомогою якого приладу його можна виміряти?
2. Поясніть, який тиск називається надлишковим? За допомогою якого приладу його можна виміряти?
3. Запишіть основне рівняння гідростатики. Розшифруйте величини, що в нього входять.
4. Поясніть, як розрахувати силу гідростатичного тиску, що діє на плоску стінку?
5. Поясніть, як розрахувати горизонтальну складову сили гідростатичного тиску, що діє на циліндричну стінку?
6. Поясніть, як розрахувати вертикальну складову сили гідростатичного тиску, що діє на циліндричну стінку?
7. Поясніть, для чого використовується тіло тиску? Чим воно обмежене?
8. Поясніть, у якому випадку тіло тиску є додатнім, а в якому – від'ємним? На яку силу це впливає?
9. Поясніть, що називається витратою рідини? Які бувають витрати?
10. Поясніть, як пов'язані між собою об'ємна та масова витрата?
11. Запишіть формулу для обчислення числа Рейнольдса у круглій трубі. Розшифруйте величини, що входять до неї.
12. Поясніть, у чому полягає фізичний зміст числа Рейнольдса?
13. Поясніть, яке значення числа Рейнольдса називається критичним? (Що відбувається при цьому значенні і чому воно дорівнює?)
14. Охарактеризуйте ламінарний режим руху рідини.
15. Охарактеризуйте турбулентний режим руху рідини.
16. Сформулюйте, які Вам відомі види втрат у трубопроводах? У яких формах можуть бути записані? (лише назвати)
17. Наведіть формули Дарсі і Вейсбаха. Як визначають коефіцієнти втрат по довжині і місцевих втрат?
18. Поясніть, на яких ділянках трубопроводу виникають втрати довжини труби? Через що?
19. Поясніть, залежність між якими величинами з'ясував Нікурадзе у знаменитих дослідах? У чому полягала особливість труб, які використав Нікурадзе?
20. Поясніть, які області на графіку Нікурадзе відповідають турбулентному режиму течії? Вплив яких параметрів переважає у кожному з областей?
21. Поясніть, на яких ділянках трубопроводу виникають місцеві втрати? Наведіть приклади.
22. Поясніть, чому полягає суть явища автомобільності?
23. Запишіть рівняння газового стану (рівнянь Менделєєва-Клапейрона). Розшифруйте величини, що в нього входять.
24. Поясніть, який термодинамічний процес називається адіабатним? Чому більшість течій газу можна вважати адіабатними?
25. Запишіть формулу швидкості звуку в потоці газу. Розшифруйте (докладно) величини, що входять до неї.
26. Запишіть формулу для числа Маха у потоці газу. Розшифруйте величини, що входять до неї. У якому діапазоні змінюється кількість маху?
27. Поясніть, яка швидкість у потоці газу називається критичною? (Можна пояснити за допомогою графіка).
28. Поясніть, у чому полягає явище «замикання сопла» при витіканні газу? (Можна пояснити за допомогою графіка). В якому вигляді сопел виникає це явище?
29. Поясніть, для чого використовується сопло Лавала? Які ділянки має таке сопло? (Можна пояснити за допомогою малюнку).

2 Завдання на курсову роботу

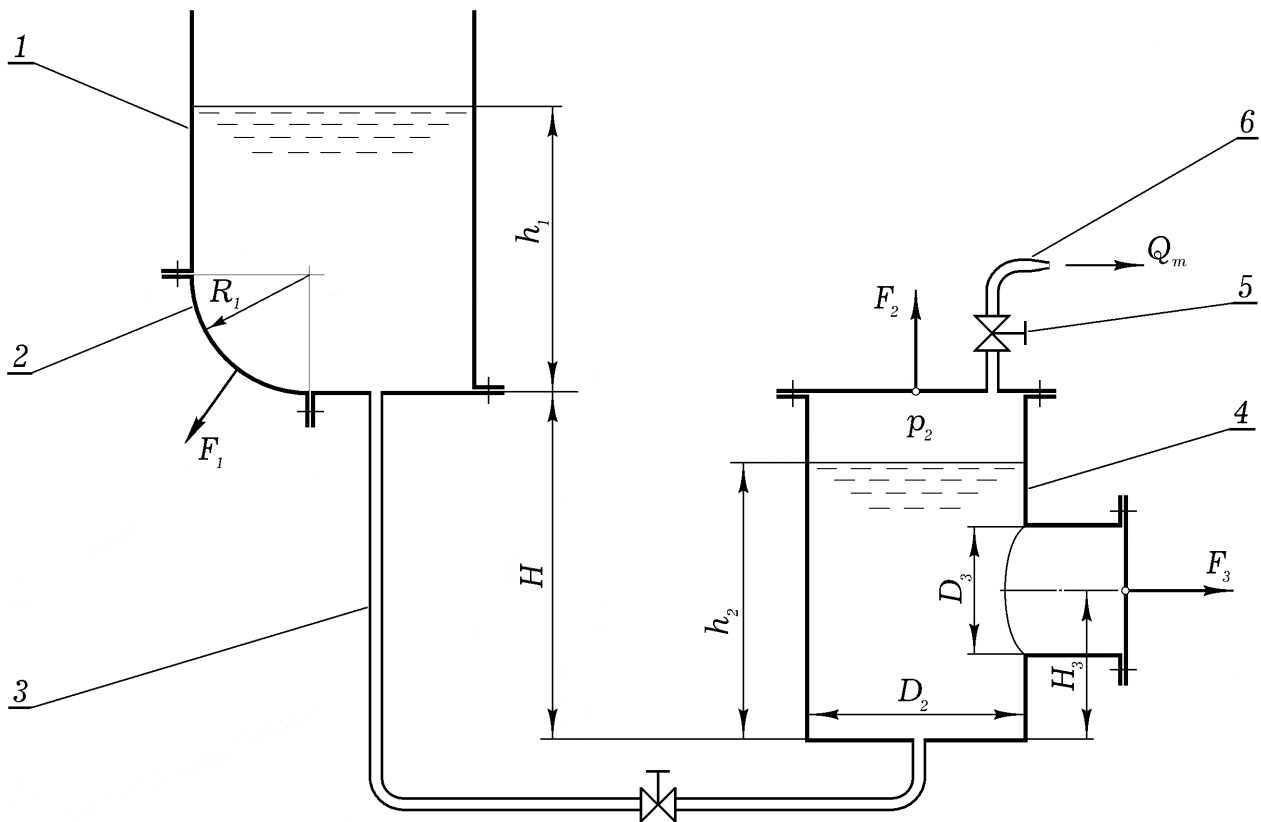


Рис. 1

При стаціонарному режимі об'ємні витрати води в трубі і повітря, що витікає через сопло, будуть однакові.

Бак 1 заповнений водою, температура якої t , до рівня h_1 (рис. 1), а бак 4 – рівня h_2 , різницю висот між баками H . Поки вентиль 5 закритий, над поверхнею води баку 4 встановлюється тиск p_2 . Зміною рівнів води в баках нехтуємо.

Потім відкривають вентиль 5 на баку 4. Стиснене повітря через сопло що звужується 6 з вихідним діаметром d_c витікає в атмосферу.

Вода перетікає в бак 4 трубопроводу 3, що містить вентиль і два повороти. Задані діаметр трубопроводу d , його довжина l і еквівалентна шорсткість k_3 .

При встановленому режимі об'ємні витрати води в трубі і повітря, що витікає через сопло, будуть однакові.

Необхідно:

1. Виконати гідростатичний розрахунок.

1.1. З таблиці вибрати значення густини води за заданої температури.

1.2. Визначити вертикальну та горизонтальну складову сили гідростатичного тиску, що діє на циліндричну стінку 2, яка має в поперечному перерізі форму чверті кола, та довжину вздовж осі b . Визначити результуючу силу гідростатичного тиску F_1 .

3 Вказівки щодо оформлення курсової роботи

Курсову роботу необхідно виконати згідно із своїм індивідуальним завданням. Плагіат або копіювання чужих результатів є неприпустимим.

Головним завданням студента є не механічне виконання розрахунків, а усвідомлення фізичної картини процесів і явищ, які вивчаються. Пам'ятайте: мета розрахунку – не число, а розуміння!

Пояснювальна записка до роботи виконується на аркушах паперу формату А4. Після титульного листа наводиться завдання на курсову роботу та вихідні дані (дозволяється розпечатати ці сторінки).

У результаті розрахунків студент спочатку пише розрахункову формулу, потім підставляє всі чисельні значення і записує результат розрахунку.

Усі величини підставляють у формули у Міжнародній системі одиниць. Якщо результат обчислень є розмірною величиною, необхідно вказувати одиниці вимірювання, наприклад

$$v = \frac{4Q}{\pi d^2} = \frac{4 \cdot 1 \cdot 10^{-3}}{\pi \cdot 0,035^2} = 1,0394 \text{ м/с.}$$

Під час обчислень потрібно зберігати щонайменше 4-5 значущих цифр.

Наприклад, округлення $\pi \approx 3,14$ призведе до того, що всі наступні результати будуть містити лише 3 вірні цифри.

Число $\lambda \approx 0,027$ містить лише дві значні цифри. Такі числа одержують не в результаті розрахунку, а в результаті грубої прикидки!

Пам'ятайте: грубі округлення в проміжних обчисленнях можуть спотворити результат, і роботу доведеться перераховувати.

Вказівки до побудови графіків

Графік має бути оформлений відповідно до діючих стандартів.

Рекомендується будувати графік на аркуші міліметровки розміром А4 зі звичайними полями. Графік повинен займати більшу частину аркуша.

Спочатку будується рівномірна сітка, вздовж осі відкладається 4 – 10 поділів із незмінним кроком. Відстані між поділками має бути кратними 2, (4), 5, 10 мм.

Масштаби вздовж осей також мають бути стандартними, тобто. кратними 2, (4), 5, 10.

Забороняється виносити на осі координати кожної розрахованої точки.

Розрахункові точки з'єднують плавними кривими з використанням лекал.

Уздовж координатних осей повинні бути зазначені позначення фізичних величин, і для розмірних величин одиниці виміру. Наприклад: « p_2 , кПа», « Q , л/с».

Дозволяється будувати графіки на комп'ютері, але при цьому має відобразитися докладна сітка. Тип графіка – «точковий» (scatter).

4 Приклад виконання курсової роботи

Державний університет «Одеська політехніка»
Кафедра екологічної безпеки та гідравліки

КУРСОВА РОБОТА

за дисципліною «Гідрогазодинаміка»

Тема роботи:

Гідростатичний, гідродинамічний і газодинамічний розрахунок комбінованої гідравлічної системи.

Виконав

студент гр. _____

Перевірив

доцент _____

(Завдання на курсову роботу можна вставити в записку пояснення у вигляді роздруковки або ксерокопії. Далі наводяться вихідні дані для розрахунку відповідно до свого варіанту індивідуального завдання.)

Вихідні дані для розрахунку

t	H	b	h_1	h_2	R_1	D_2	D_3	H_3	l	d_c	d	k_s
$^{\circ}\text{C}$	м	м	м	м	м	м	м	м	м	мм	мм	мм
62	5,4	2,4	2,4	2,8	1	1	1,2	0,9	9,8	2,7	27	0,4

1. Гідростатичний розрахунок

Спочатку згідно із таблицею таблиці (Додаток 1) вибираємо густину води при заданій температурі. При $t = 62^{\circ}\text{C}$: $\rho = 982,2 \text{ кг/м}^3$.

Для розрахунку вертикальної складової сили гідростатичного тиску будемо тіло тиску (заштрихована область на рис. 1).

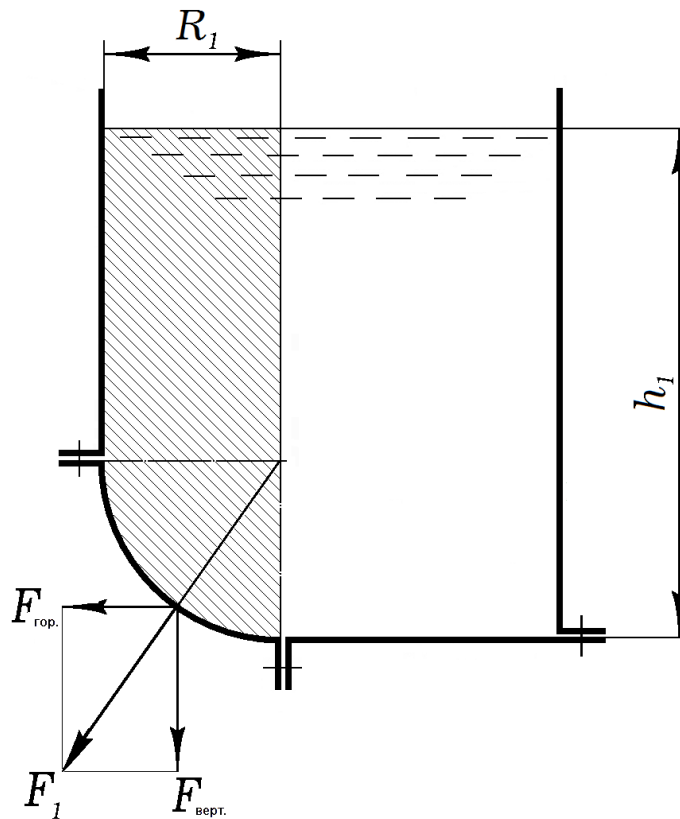


Рис. 1

Об'єм тіла тиску обчислюємо як суму об'ємів прямокутного паралелепіпеда та чверті кругового циліндра:

$$V_{\text{т.т.}} = R_1 b \left[h_1 + R_1 \left(\frac{\pi}{4} - 1 \right) \right] = 1 \cdot 2,4 \cdot [2,4 + 1 \cdot (0,78540 - 1)] = 5,2450 \text{ м}^3 \quad (1)$$

Вертикальна складова сили гідростатичного тиску дорівнює вазі рідини, що міститься в тілі тиску:

$$F_{\text{верт.}} = \rho g V_{\text{т.т.}} = 982,2 \cdot 9,8 \cdot 5,2450 = 50486 \text{ Н} \quad (2)$$

Оскільки тіло тиску є позитивним (змочує стінку), вертикальна складова сили спрямована вниз.

Площа проекції циліндричної стінки на вертикальну площину

$$A_{\text{верт.}} = R_1 b = 1 \cdot 2,4 = 2,4 \text{ м}^2 \quad (3)$$

Центр мас цієї проекції знаходиться на глибині

$$h_{ц.м.} = h_1 - \frac{R_1}{2} = 2,4 - \frac{1}{2} = 1,9 \text{ м} \quad (4)$$

Тиск у центрі мас цієї проекції

$$p_{ц.м.} = \rho g h_{ц.м.} = 982,2 \cdot 9,8 \cdot 1,9 = 18289 \text{ Па} \quad (5)$$

Горизонтальна складова сили гідростатичного тиску

$$F_{гор} = p_{ц.м.} A_{верт} = 18289 \cdot 2,4 = 43893 \text{ Н} \quad (6)$$

Обчислюємо модуль сили гідростатичного тиску F_1 :

$$F_1 = \sqrt{F_{гор}^2 + F_{верт}^2} = \sqrt{43893^2 + 50486^2} = 66898 \text{ Н} \quad (7)$$

На рис. 1 тіло тиску заштриховане.

На осі циліндричної кришки прикладаємо дві проекції сили гідростатичного тиску.

Проводимо вектор сили, як діагональ прямокутника.

Точка перетину вектора з циліндричною стінкою дає точку прикладання сили.

Координати точки прикладання сили розраховуємо за формулами

$$x_D = -R_1 \frac{F_{гор}}{F_1} = 1 \cdot \frac{43893}{66898} = -0,6561 \text{ м}$$

$$y_D = R_1 \left(1 - \frac{F_{верт}}{F_1} \right) = 1 \cdot \left(1 - \frac{50486}{66898} \right) = 0,2453 \text{ м}$$

Паралелограм сил остаточно будуємо у точці прикладання сили.

Визначаємо тиск над поверхнею води у другому баку для випадку, коли вода нерухома:

$$p_2^{ст} = \rho g (H + h_1 - h_2) = 982,2 \cdot 9,8 \cdot (5,4 + 2,4 - 2,8) = 48128 \text{ Па} \quad (8)$$

Розраховуємо сили гідростатичного тиску, що діють інші дві кришки.

$$F_2 = p_2^{ст} \frac{\pi D_2^2}{4} = 48128 \frac{\pi \cdot 1^2}{4} = 37800 \text{ Н} \quad (9)$$

Тиск у центрі тяжкості третьої кришки

$$p_3 = \rho g (H + h_1 - H_3) = 982,2 \cdot 9,8 \cdot (5,4 + 2,4 - 0,9) = 66416 \text{ Па}$$

Сила, що діє на третю кришку

$$F_3 = p_3 \frac{\pi D_3^2}{4} = 66416 \frac{\pi \cdot 1,2^2}{4} = 75115 \text{ Н} \quad (10)$$

2. Гідравлічний розрахунок

Розраховуємо кінематичну в'язкість води за заданої температури за формулою:

$$\nu = \frac{1,775 \cdot 10^{-6}}{1 + 0,0337 \cdot t + 0,000221 \cdot t^2} = \frac{1,775 \cdot 10^{-6}}{1 + 0,0337 \cdot 62 + 0,000221 \cdot 62^2} = 4,5063 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с} \quad (11)$$

Сумарний коефіцієнт місцевих втрат складається з коефіцієнта втрат вентиля ($\zeta_{в} = 5,0$), входу в трубу ($\zeta_{вх} = 0,5$), виходу в бак великих розмірів ($\zeta_{вих} = 1,0$) та двох поворотів ($\zeta_{пов} = 0,25$). Сумарний коефіцієнт втрат

$$\sum \zeta_i = \zeta_{в} + \zeta_{вх} + \zeta_{вих} + 2\zeta_{пов} = 5 + 0,5 + 1 + 2 \cdot 0,25 = 7,0.$$

Статичний тиск над поверхнею води в другому баку, тобто тиск при нульовій витраті води, дорівнює $p_2^{ст} = 48128$ Па. Якщо вода у трубі рухається, величина тиску у другому баку зменшується на величину втрат тиску.

Для одного значення витрати виконаємо докладний розрахунок.

Вибираємо витрату води $Q = 1 \text{ л/с} = 0,001 \text{ м}^3/\text{с}$.

Середня (середньовитратна) швидкість води в трубі

$$v = \frac{4Q}{\pi d^2} = \frac{4 \cdot 0,001}{\pi \cdot 0,027^2} = 1,7466 \text{ м/с.} \quad (12)$$

Число Рейнольдса

$$Re = \frac{vd}{\nu} = \frac{1,7466 \cdot 0,027}{4,5063 \cdot 10^{-7}} = 104647 \quad (13)$$

Оскільки $Re > 4000$, гідравлічний коефіцієнт тертя (коефіцієнт Дарсі) обчислюємо за формулою Альтшуля

$$\lambda = 0,11 \cdot \left(\frac{68}{Re} + \frac{k_s}{d} \right)^{0,25} = 0,11 \cdot \left(\frac{68}{104647} + \frac{0,0004}{0,027} \right)^{0,25} = 0,038791 \quad (14)$$

Втрати тиску у трубі

$$\Delta p = \left(\frac{\lambda l}{d} + \sum \zeta_i \right) \frac{\rho v^2}{2} = \left(\frac{0,038791 \cdot 9,8}{0,027} + 7 \right) \cdot \frac{982,2 \cdot 1,7466^2}{2} = 31579 \text{ Па.} \quad (15)$$

Тиск у другому баку за даної витрати

$$p_2 = p_2^{\text{ст}} - \Delta p = 48128 - 31579 = 16549 \text{ Па.} \quad (16)$$

Розрахунок за формулами (12) – (16) повторюємо для кількох значень Q . Ці значення вибираються таким чином, щоб точки на графіку розташовувалися більш-менш рівномірно. (Оскільки за умовою завдання повітря другого бака витікає в атмосферу, в досліджуваному діапазоні витрат тиски p_2 повинні бути позитивними. Якщо в розрахунку p_2 вийде негативним, обрану витрату Q необхідно зменшити.)

Задаємо ще кілька значень витрат води Q , наприклад, 0,2 л/с, 0,4 л/с і т.д. Результати розрахунку подаємо у вигляді таблиці 1.

Таблиця 1

Гідравлічний розрахунок

Q л/с	Q м ³ /с	v м/с	Re -	λ -	Δp Па	p_2 кПа
0	0	0	0	0	0	48,128
0,2	0,0002	0,34931	20929	0,040327	1297	46,831
0,4	0,0004	0,69862	41859	0,039388	5105	43,023
0,6	0,0006	1,04793	62788	0,039060	11421	36,707
0,8	0,0008	1,3972	83717	0,038892	20246	27,882
0,8787	0,0008787	1,5347	91953,1	0,038847	24406	23,722
1	0,001	1,74656	104647	0,038791	31579	16,549
1,234	0,001234	2,15525	129134	0,038713	48023	0,105

Залежність $p_2(Q)$ наносимо на графік (рис. 2). З графіка визначаємо значення витрати $Q_{\text{max}} = 1,234 \text{ м}^3/\text{с}$, за якої p_2 обертається на нуль (графік перетинається з горизонтальною віссю). Витрата Q_{max} відповідає випадку, коли з другого бака зняли кришку.

3. Газодинамічний розрахунок

Розрахунок виконується для повітря (показник адіабати $k = 1,4$, питома газова постійна $R = 287 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$). У всіх формулах газової динаміки за умовчанням використовуються абсолютні тиски та абсолютні термодинамічні температури.

Вважаємо, що баку перед соплом встановилися параметри гальмування. Температура гальмування

$$T^* = t + 273,15 = 62 + 273,15 = 335,15 \text{ К.}$$

Максимальний надлишковий тиск у баку досягається за відсутності витікання повітря через сопло:

$$p_{\text{ст}} = 48128 \text{ Па.}$$

Абсолютний тиск навколишнього середовища дорівнює стандартному атмосферному тиску:

$$p_{\text{атм}} = 101325 \text{ Па.}$$

Критичне відношення тисків для повітря $\beta_{\text{кр}} = 0,5283$.

Площа поперечного перерізу сопла

$$A_c = \frac{\pi d_c^2}{4} = \frac{\pi \cdot 0,0027^2}{4} = 5,72555 \text{ м}^2.$$

Коефіцієнт витрати сопла приймаємо рівним $\mu = 0,9$.

Вибираємо не менше 8 значень надлишкового тиску в баку $p_2^{\text{надл}}$ в діапазоні від 0 до $p_2^{\text{ст}} = 48128 \text{ Па}$, а саме: 0, 2, 5, 10, 15, 20, ... 45 кПа.

Для значення тиску $p_2^{\text{надл}} = 40 \text{ кПа}$ розрахунок виконуємо докладно.

Абсолютний тиск нерухомого повітря в баку (тиск гальмування)

$$p^* = p_2^{\text{надл}} + p_{\text{атм}} = 40000 + 101325 = 141325 \text{ Па.} \quad (17)$$

Густина гальмування

$$\rho^* = \frac{p^*}{RT^*} = \frac{141325}{287 \cdot 335,15} = 1,46926 \text{ кг/м}^3. \quad (18)$$

Відношення тисків

$$\beta = \frac{p_{\text{атм}}}{p^*} = \frac{101325}{141325} = 0,71696. \quad (19)$$

Оскільки $\beta > \beta_{\text{кр}}$, витікання відбувається у дозвуковому режимі. Параметр B обчислюємо за формулою

$$B = \sqrt{\frac{2k}{k-1} \left(\beta^{\frac{2}{k}} - \beta^{\frac{k+1}{k}} \right)} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1,4}{1,4-1} \left(0,71696^{\frac{2}{1,4}} - 0,71696^{\frac{1,4+1}{1,4}} \right)} = 0,62821. \quad (20)$$

Масову витрату повітря визначаємо за формулою

$$Q_m = \mu A_c B \sqrt{p^* \rho^*} = 0,9 \cdot 5,7256 \cdot 0,62821 \sqrt{141325 \cdot 1,46926} = 1,4751 \cdot 10^{-3} \text{ кг/с.} \quad (22)$$

Секундне зменшення об'єму повітря у баку

$$Q = \frac{Q_m}{\rho^*} = \frac{1,4751 \cdot 10^{-3}}{1,46926} = 1,00398 \text{ м}^3/\text{с} \quad (23)$$

Розрахунок за формулами (17) – (23) повторюємо ще десяти обраних значень $p_{\text{надл}}$.

Результати розрахунку подаємо у вигляді таблиці 2.

Таблиця 2

Газодинамічний розрахунок

$p_{\text{надл}}$ кПа	p^* Па	ρ^* кг/м ³	β -	B -	Q_m кг/с	Q м ³ /с
0	101325	1,05341	1	0	0	0
2	103325	1,0742	0,98064	0,1947	0,00033426	0,00031117
5	106325	1,10539	0,95297	0,29885	0,00052795	0,00047761

10	111325	1,15737	0,91017	0,40295	0,00074531	0,00064397
15	116325	1,20935	0,87105	0,47146	0,00091121	0,00075347
20	121325	1,26133	0,83515	0,52104	0,00105033	0,00083271
23,72	125047	1,30003	0,8103	0,54985	0,0011424	0,00087875
30	131325	1,36529	0,77156	0,5875	0,00128189	0,00093891
35	136325	1,41728	0,74326	0,61024	0,00138221	0,00097526
40	141325	1,46926	0,71696	0,62821	0,0014751	0,00100398
45	146325	1,52124	0,69247	0,64245	0,00156192	0,00102674

4. Завершальний етап

За допомогою графоаналітичного розрахунку знайдемо, яке значення витрати та який тиск у другому баку встановляться під час роботи системи в цілому. Для цього побудуємо наступний графік (рис. 3).

По горизонтальній осі відкладемо об'ємну витрату Q , а по вертикальній – надлишковий тиск у другому баку p_2 .

Перша крива – залежність $Q = f(p_2)$ за даними табл. 2, друга крива – залежність $p_2 = f(Q)$ за даними табл. 1.

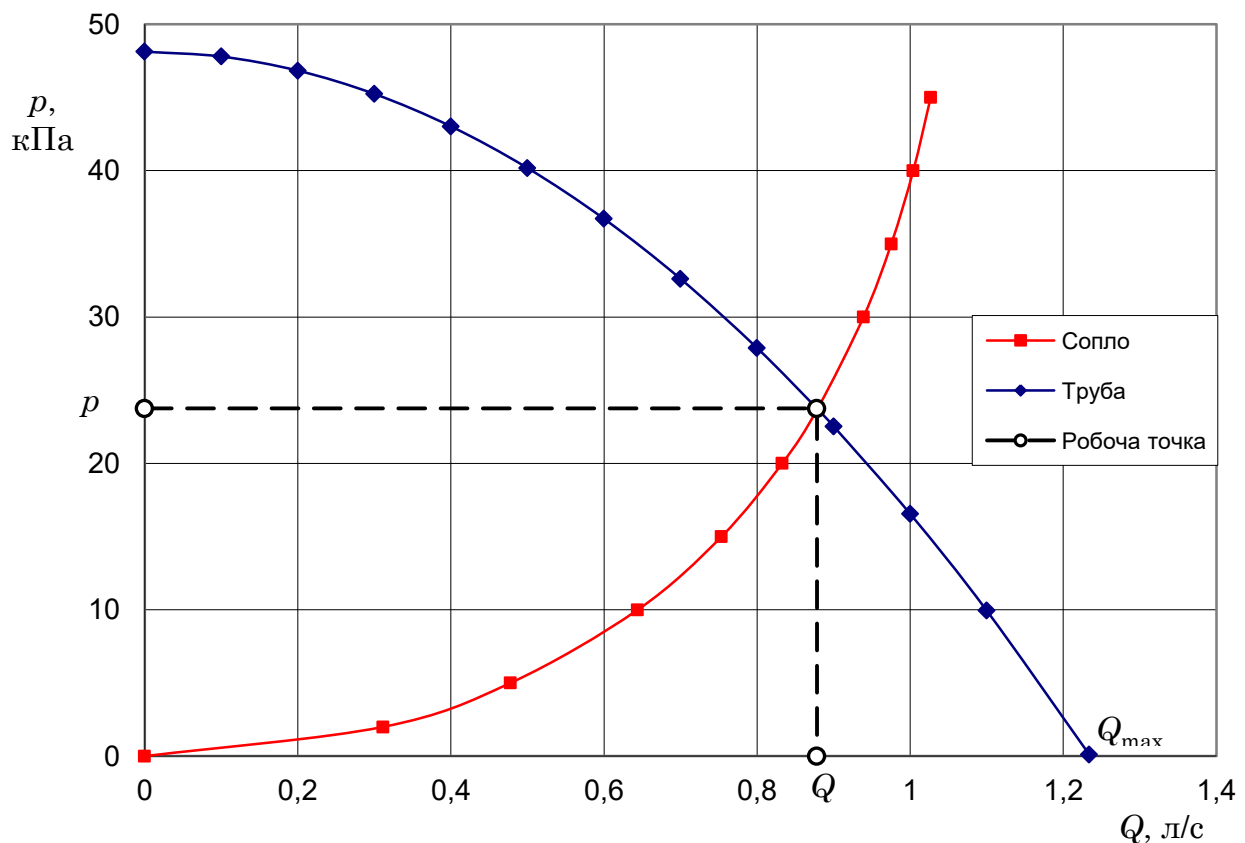


Рис. 2

Точка перетину двох кривих – це робоча точка системи. Вона показує фактичну об'ємну витрату в системі та фактичний тиск у баку. З графіка визначаємо значення $Q_{\text{ф}} = 0,879 \text{ м}^3/\text{с}$ і $p_{\text{ф}} = 23,72 \text{ кПа}$.

Для перевірки обчислюємо значення Q в одному з рядків з табл. 2, використовуючи фактичний тиск $p_{\text{ф}} = 23,72 \text{ кПа}$.

Література

1. Гідрогазодинаміка: навчальний посібник / О.Г. Бутенко, А.В. Карамушко, С.Ю. Смик, С.В. Сурков. – Одеса: Національний університет «Одеська політехніка» (електронне видання), 2021. – 332 с.
2. Бутенко О.Г. Технічна гідромеханіка: Навчальний посібник. – О.: Наука і техніка, 2016. – 300 с.
3. Сурков С.В. Конспект лекцій за дисципліною "Гідрогазодинаміка" для студентів спеціальності 143 (частина 1). – Одеса: ОНПУ (електронне видання), 2018 – 39 с.
4. Сурков С.В. Конспект лекцій за дисципліною "Гідрогазодинаміка" для студентів спеціальності 143 (частина 2). – Одеса: ОНПУ (електронне видання), 2018 – 45 с.
5. Сурков С.В. Методичні вказівки до виконання курсових робіт за дисципліною "Гідрогазодинаміка" для студентів спеціальності 143 – Одеса: ОНПУ (електронне видання), 2018 – 45 с.
6. Дейч М.Е., Зарянкин А.Е. Гидрогазодинамика. Учеб. Пособие для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 384 с.
7. Повх І.Л. Технічна гідромеханіка – Л.: Машинобудування, 1976. – 504 с.
8. Довідник з гідравліки / В.А. Большаков, Ю.М. Константинов, В.М. Попов та ін. – К.: Вища школа, 1984. – 343 с.

Додаток 1.

Густина води в залежності від температури

$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг/м}^3$
4	1000	38	992,99	54	986,21	64	981,13	74	975,48
10	999,73	40	992,24	55	985,73	65	980,59	75	974,89
15	999,13	42	991,47	56	985,25	66	980,05	76	974,29
20	998,23	44	990,66	57	984,75	67	979,5	77	973,68
25	997,07	46	989,83	58	984,25	68	978,94	78	973,07
28	996,26	48	988,96	59	983,75	69	978,38	79	972,45
30	995,67	50	988,07	60	983,24	70	977,81	80	971,83
32	995,05	51	987,62	61	982,72	71	977,23	81	971,21
34	994,4	52	987,15	62	982,2	72	976,66	82	970,57
36	993,71	53	986,69	63	981,67	73	976,07	83	969,94

Додаток 2.

Варіанти вихідних даних

№ варіанта	t	H	b	h_1	h_2	R_1	D_2	D_3	H_3	l	d_c	d	k_e
	$^\circ\text{C}$	м	м	м	м	м	м	м	м	м	мм	мм	мм
1	4	5	3	3	3	1,2	1,2	1,4	1,1	10	3,5	35	0,5
2	58	4,9	2,9	2,9	2,9	1,15	1,15	1,35	1,05	9,8	3,4	34	0,45
3	10	4,8	2,8	2,8	2,8	1,1	1,1	1,3	1	9,6	3,3	33	0,4
4	59	4,7	2,7	2,7	2,7	1,05	1,05	1,25	0,95	9,4	3,2	32	0,35
5	15	4,6	2,6	2,6	2,6	1	1	1,2	0,9	9,2	3,1	31	0,3
6	60	4,5	2,5	2,5	2,5	0,95	0,95	1,15	0,85	9	3	30	0,25
7	20	4,4	2,4	2,4	2,4	0,9	0,9	1,1	0,8	8,8	2,9	29	0,2
8	61	4,3	2,3	2,3	2,3	0,85	0,85	1,05	0,75	8,6	2,8	28	0,15

9	25	4,2	2,2	2,2	2,2	0,8	0,8	1	0,7	8,4	2,7	27	0,1
10	62	4,1	2,1	2,1	3	0,75	0,75	0,95	0,65	8,2	2,6	26	0,5
11	28	4	3	3	2,9	0,7	0,7	0,9	0,6	8	2,5	25	0,45
12	63	5	2,9	2,9	2,8	0,65	0,65	0,85	0,55	10	2,4	24	0,4
13	30	4,9	2,8	2,8	2,7	0,6	0,6	0,8	0,5	9,8	2,3	23	0,35
14	64	4,8	2,7	2,7	2,6	1,2	1,2	1,4	1,1	9,6	2,2	22	0,3
15	32	4,7	2,6	2,6	2,5	1,15	1,15	1,35	1,05	9,4	2,1	21	0,25
16	65	4,6	2,5	2,5	2,4	1,1	1,1	1,3	1	9,2	2	20	0,2
17	34	4,5	2,4	2,4	2,3	1,05	1,05	1,25	0,95	9	3,5	35	0,15
18	66	4,4	2,3	2,3	2,2	1	1	1,2	0,9	8,8	3,4	34	0,1
19	36	4,3	2,2	2,2	3	0,95	0,95	1,15	0,85	8,6	3,3	33	0,5
20	67	4,2	2,1	2,1	2,9	0,9	0,9	1,1	0,8	8,4	3,2	32	0,45
21	38	4,1	3	3	2,8	0,85	0,85	1,05	0,75	8,2	3,1	31	0,4
22	68	4	2,9	2,9	2,7	0,8	0,8	1	0,7	8	3	30	0,35
23	40	5	2,8	2,8	2,6	0,75	0,75	0,95	0,65	10	2,9	29	0,3
24	69	4,9	2,7	2,7	2,5	0,7	0,7	0,9	0,6	9,8	2,8	28	0,25
25	42	4,8	2,6	2,6	2,4	0,65	0,65	0,85	0,55	9,6	2,7	27	0,2
26	70	4,7	2,5	2,5	2,3	0,6	0,6	0,8	0,5	9,4	2,6	26	0,15
27	44	4,6	2,4	2,4	2,2	1,2	1,2	1,4	1,1	9,2	2,5	25	0,1
28	71	4,5	2,3	2,3	3	1,15	1,15	1,35	1,05	9	2,4	24	0,5
29	46	4,4	2,2	2,2	2,9	1,1	1,1	1,3	1	8,8	2,3	23	0,45
30	72	4,3	2,1	2,1	2,8	1,05	1,05	1,25	0,95	8,6	2,2	22	0,4
31	48	4,2	3	3	2,7	1	1	1,2	0,9	8,4	2,1	21	0,35
32	73	4,1	2,9	2,9	2,6	0,95	0,95	1,15	0,85	8,2	2	20	0,3
33	50	4	2,8	2,8	2,5	0,9	0,9	1,1	0,8	8	3,5	35	0,25
34	74	5	2,7	2,7	2,4	0,85	0,85	1,05	0,75	10	3,4	34	0,2
35	51	4,9	2,6	2,6	2,3	0,8	0,8	1	0,7	9,8	3,3	33	0,15
36	75	4,8	2,5	2,5	2,2	0,75	0,75	0,95	0,65	9,6	3,2	32	0,1
37	52	4,7	2,4	2,4	3	0,7	0,7	0,9	0,6	9,4	3,1	31	0,5
38	76	4,6	2,3	2,3	2,9	0,65	0,65	0,85	0,55	9,2	3	30	0,45
39	53	4,5	2,2	2,2	2,8	0,6	0,6	0,8	0,5	9	2,9	29	0,4
40	77	4,4	2,1	2,1	2,7	1,2	1,2	1,4	1,1	8,8	2,8	28	0,35
41	54	4,3	3	3	2,6	1,15	1,15	1,35	1,05	8,6	2,7	27	0,3
42	78	4,2	2,9	2,9	2,5	1,1	1,1	1,3	1	8,4	2,6	26	0,25
43	55	4,1	2,8	2,8	2,4	0,75	1,05	1,25	0,95	8,2	2,5	25	0,2
44	79	4	2,7	2,7	2,3	1	1	1,2	0,9	8	2,4	24	0,15
45	56	5	2,6	2,6	2,2	0,95	0,95	1,15	0,85	10	2,3	23	0,1
46	80	4,9	2,5	2,5	3	0,9	0,9	1,1	0,8	9,8	2,2	22	0,5
47	57	4,8	2,4	2,4	2,9	0,85	0,85	1,05	0,75	9,6	2,1	21	0,45
48	81	4,7	2,3	2,3	2,8	0,8	0,8	1	0,7	9,4	2	20	0,4