

ВТРАТИ НАПОРУ. КЛАСИФІКАЦІЯ ВТРАТ НАПОРУ

Рухома рідина на своєму шляху переборює сили тертя об стінки труби та місцеві опори (крани, засувки, коліна, переходи, трійники тощо), тому частка питомої енергії (напір) втрачається.

Два види втрат напору: втрати по довжині потоку h_l і втрати напору на місцевих опорах h_m

Сумарні втрати напору визначаються виразом: $h_{l-2} = h_l + h_m$, де h_l - сумарні втрати напору по довжині трубопроводу на всіх його ділянках; h_m - сумарні втрати напору на місцевих опорах.

Втрати напору по довжині потоку зумовлені довжиною гідроліній, шорсткістю стінок трубопроводу, в'язкістю рідини.

Відрізки гідроліній, в межах яких спостерігається зміна конфігурації потоку, називаються місцевими опорами. На зміну конфігурації потоку витрачається енергія. Такими місцевими опорами є крани, гідроапарати, коліна, різкі звуження чи розширення труби та ін.

Втрати напору на місцевих опорах пов'язані з деформацією (змінанням) потоку, зміною характеру, напрямку його руху. При цьому утворюються мікро- та макровихори, на формування яких і витрачається частина енергії (напору).

Якщо відомі всі основні величини потоку (z, p, V), то втрати напору між двома перерізами можна визначити із рівняння Бернуллі

$$h_{l-2} = \left(z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} \right) - \left(z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} \right).$$

Визначення втрат напору в трубопроводах любых гідросистем є дуже важливим: вони визначають вибір необхідних параметрів насосів, приводних двигунів. Якщо в будь-якій гідросистемі подачі рідини втрати напору більші, ніж напір, який утворює насос, то така система працювати не буде.

Втрати напору зумовлені незворотним переходом механічної енергії потоку в теплову. Механізм дії сил опору дуже складний. Аналітично поки що не одержані точні теоретичні співвідношення до їх розрахунку, тому часто використовують емпіричні залежності.

Втрати напору Класифікація втрат напору

Рухома рідина на своєму шляху переборює сили тертя об стінки труби та місцеві опори (крани, засувки, коліна, переходи, трійники тощо), тому частка питомої енергії (напір) втрачається.

Два види втрат напору: втрати по довжині потоку h_l і втрати напору на місцевих опорах h_m

Сумарні втрати напору визначаються виразом: $h_{l-2} = h_l + h_m$, де h_l - сумарні втрати напору по довжині трубопроводу на всіх його ділянках; h_m - сумарні втрати напору на місцевих опорах.

Втрати напору по довжині потоку зумовлені довжиною гідроліній, шорсткістю стінок трубопроводу, в'язкістю рідини.

Відрізки гідроліній, в межах яких спостерігається зміна конфігурації потоку, називаються місцевими опорами. На зміну конфігурації потоку витрачається енергія. Такими місцевими опорами є крани, гідроапарати, коліна, різкі звуження чи

розширення труби та ін.

Втрати напору на місцевих опорах пов'язані з деформацією (змінанням) потоку, зміною характеру, напрямку його руху. При цьому утворюються мікро та макровихори, на формування яких і витрачається частина енергії (напору). Якщо відомі всі основні величини потоку (z, p, V), то втрати напору між двома перерізами можна визначити із рівняння Бернуллі

$$h_{1-2} = (z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g}) - (z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g}).$$

Визначення втрат напору в трубопроводах любых гідросистем є дуже важливим: вони визначають вибір необхідних параметрів насосів, приводних двигунів. Якщо в будь-якій гідросистемі подачі рідини втрати напору більші, ніж напір, який утворює насос, то така система працювати не буде.

Втрати напору зумовлені незворотним переходом механічної енергії потоку в теплову. Механізм дії сил опору дуже складний. Аналітично поки що не одержані точні теоретичні співвідношення до їх розрахунку, тому часто використовують емпіричні залежності.

Ламінарний і турбулентний режими руху в потоках реальної рідини

Установка О. Рейнольдса (1883 г) для дослідження режимів руху рідини представлена на рис.1. До бака А, заповненому досліджуваною рідиною, приєднана горизонтальна скляна труба В із краном С, призначеним для регулювання швидкості руху рідини. Над баком А установлений бак Д з розчином фарби, від якого відходить тонка скляна трубка з регулюючим вентилям Е. Рівень рідини у баці може підтримуватися постійним.

Після заповнення баків рідини якийсь час витримують в нерухомому стані, а, потім поступово відкривають крани С і Е; при цьому встановлюються необхідні режими руху рідини. Знаючи обсяг мірної ємності і час її заповнення, можна визначити витрату рідини.

О. Рейнольдс установив, що при невеликій швидкості потоку v_1 пофарбована рідина рухається чітко вираженим тонким струмком, не змішуючись з потоком незабарвленої рідини, тому що швидкість і тиск в потоці постійні, відсутні їх коливання (пульсації). Рідина в потоці рухається шарами- циліндрами (труба круга).

При збільшенні швидкості потоку в трубі до v_2 пофарбований струмок приймає хвилеподібну форму (рис. а), при швидкості $v_3 > v_2$ на окремих його ділянках з'являються розриви (рис.б), і при певному значенні швидкості v_4 струмок цілком руйнується, розмиваючись досліджуваною рідиною (рис.в). В цей час частинки рідини «описують» складні криволінійні траєкторії, бо шаруватий рух рідини переходить у вихороподібний обертальний рух. Пезометр чи трубка Пито покажуть безупинні пульсації тиску і швидкостей у потоці рідини. Якщо поступово прикривати кран С і зменшувати швидкість руху рідини в трубі В, первісний характер руху відновиться.

Ламінарний режим руху рідини (від латинського слова *lamina* — смужка, шар). Спостерігається при малих швидкостях, при якому окремі струминки рідини рухаються паралельно один одному й осі потоку. Цей режим спостерігається в тонких капілярних трубках, у кровоносних судинах, а також при русі по трубах

дуже вязких рідин: нафти, мазуту, мастил і т.п.

Турбулентний режим руху рідини (від латинського слова *turbulentus* — безладний) — відрізняється неупорядкованим рухом частинок рідини і виявляється при великих швидкостях. Незважаючи на свою складність, турбулентний режим руху має певні закономірності. У потоці рідини спостерігаються тоненькі пристіночні шари з ламінарним режимом та з перехідним режимом і турбулентне ядро потоку. Турбулентний рух зустрічається досить часто в гідротехнічній і гідромеліоративній практиці: при русі води в трубах, каналах, ріках і т.д.

О.Рейнольдс також установив, що перехід від ламінарного режиму до турбулентного відбувається при певних швидкостях, які він назвав **критичними**. Значення критичних швидкостей непостійні. Тому для характеристики режиму руху рідини був уведений більш об'єктивний показник — безрозмірний параметр, названий числом (критерієм) Рейнольдса ***Re***

$$Re = v d \rho / \mu = v d / \nu,$$

де ***v*** — середня швидкість рідини в потоці,

d — діаметр труби,

ρ — густина рідини в трубі,

μ — коефіцієнт динамічної вязкості рідини,

$\underline{\nu} = \mu / \rho$ — коефіцієнт кінематичної в'язкості.

По дослідженнях, виконаних німецьким гідравліком Шиллером, мінімальне значення числа Рейнольдса дорівнює 2320 і називається критичним.

$$Re_{кр} = 2320. \quad (2)$$

Отже, значення критичної швидкості може бути знайдене з рівняння (1):

$$v_{кр} = Re_{кр} \nu / d = 2320 \nu / d. \quad (3)$$

Число ***Re* = 2320** не слід розглядати як строго регламентоване. Воно може мінятися в досить широких межах і залежить не тільки від величин у формулі (1), але і від: шорсткості труб, коливань трубопроводу, різкої зміни швидкості й ін.

Якщо усунути вплив цих факторів, то можна затримати перехід ламінарного режиму в турбулентний і довести значення ***Re_{кр}*** до **11000—13000**.

Однак ламінарний режим руху в цій зоні хитливий і легко переходить у турбулентний. Така зона називається перехідною. В даний час у практичних розрахунках звичайно виходять з одного критичного значення числа Рейнольдса ***Re_{кр}* = 2320**. Вважається, що коли ***Re* < 2320** завжди має місце ламінарний режим, а при ***Re* > 2320** — турбулентний.

Такий підхід забезпечує деякий запас стійкості при гідравлічних розрахунках.

Можна визначити критичне значення числа Рейнольдса для труб не тільки круглого перетину, але і будь-якої іншої конфігурації. Введемо поняття гідралічного радіуса ***R* = *S* / *χ***, де ***S*** — площа перерізу труби (каналу), ***χ*** — змочений периметр труби. Для труби круглого перерізу

$$R = ((\pi d^2) / 4) / \pi d = d / 4. \text{ Тоді } d = 4R, \text{ а } Re = v 4R / \nu, \text{ відкіля } v R / \nu = Re / 4.$$

Приймаючи ***Re_{кр}* = 2320**, незалежно від форми живого перетину, знаходимо значення критерію для перетину будь-якої форми: **2320 / 4 = 575**. Таким чином, якщо ***v R* / *ν* < 575**, то режим буде ламінарним, якщо ж ***v R* / *ν* > 575**, то — турбулентним.

Розподіл швидкостей при ламінарному режимі руху рідини

При ламінарному русі рідини в круглій трубі найбільша швидкість розвивається в центрі труби, а найменша — у стінок. Для рідин, які добре змочують стінки труби, швидкість частинок біля стінки дорівнює нулю. Обсяг рідини по всьому перетині як би розділяється на нескінченно велику кількість тонких, концентрично розташованих паралельно осі трубопроводу циліндрів різного радіуса, телескопічно висуваються пошарово один із одного. Поверхня, що обгинає ці циліндри, параболічна, а в осьовому перерізі являє собою епіюру швидкостей у виді параболи (рис.2).

Середня швидкість при ламінарному плині в два рази менше максимальної $v = u_{\max}/2$ или $u_{\max} = 2v$, а вираз для витрати $Q = v\pi d^2/4$.

Розподіл швидкостей при турбулентному русі рідини

Експериментальні дослідження показують, що й у «безладному» турбулентному потоці існують цілком визначені закономірності, що пояснюють не тільки механізм самого руху, але і дають кількісну оцінку окремих явищ.

За допомогою високоточних приладів реєструють зміну швидкостей у часі в різних точках потоку і визначають осередненню швидкість (рис.3). Швидкість, котра вимірюється в кожен момент часу в даній крапці, називається миттєвою. Різниця між миттєвою й осередненою швидкістю називається швидкістю пульсації, яка може бути як позитивною, так і негативною. При турбулентному русі звичайно розглядають осереднені швидкості.

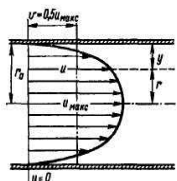


Рис.2

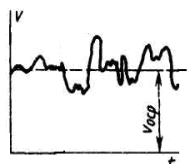


Рис.3

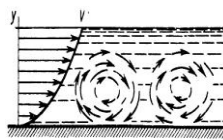


Рис. 4

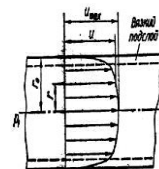


Рис. 5

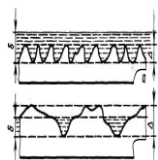


Рис. 6

Для турбулентного потоку характерна наявність вихорів, тобто мас рідини, захоплених в обертальний рух. Експериментально встановлено, що розмір вихрів складає приблизно 2/3 глибини потоку. Тертя біля стінок сповільнює швидкість течії і викликає закручування певних мас рідини, а поява так званих вальців (рис.4) і вихорів, які у процесі переносу потоком дробляться під впливом навколишньої рідини на дрібні турбулентні утворення, що поступово гаснуть і перестають існувати. Механічна енергія вихрів перетворюється в теплову.

По схемі, запропонованій Прандтлем (рис. 5), при турбулентному режимі основна

частина потоку складається з турбулентного ядра, у якому спостерігається пульсація швидкості і відбувається перемішування часток. Біля стінки розташований шар, характер руху в якому близький до ламінарного. Цей шар називається приграничною ламінарною плівкою. На стінці швидкість руху дорівнює нулю, а в межах ламінарної плівки вона зростає по лінійному закону.

У ядрі потоку, де відбуваються перемішування і взаємний перенос часток з різними швидкостями з одного шару в іншій у напрямку, перпендикулярному напрямку плину, швидкості найбільш вирівняні. Це добре видно при порівнянні кривих розподілу швидкостей у ламінарному і турбулентному потоках в одній і тій же трубі і при тій самій витраті (при однаковій середній швидкості). Цим пояснюється той факт, що коефіцієнт Кориоліса α , що враховує нерівномірність розподілу швидкостей у рівнянні Бернуллі, при турбулентному режимі значно менше, ніж при ламінарному. На відміну від ламінарного режиму руху, де цей коефіцієнт не залежить від числа Рейнольдса ($\alpha = 2$), при турбулентному режимі він є функцією числа Re і зменшується, поступово наближаючись до одиниці в міру збільшення числа Re .

Шорсткість стінок. Гидравлически гладкі і шорсткуваті труби

Поверхні стінок трубопроводів мають шорсткість, яка характеризується розміром і формою різних нерівностей і виступів на поверхні стінки. Розмір нерівностей залежить від матеріалів труб і від способу їхнього виготовлення. З часом шорсткість стінок зростає в результаті корозії, відкладення опадів і т.п. У гідравліці як основну характеристику шорсткості прийнята так називана абсолютна шорсткість Δ , що являє собою середнє значення виступів і нерівностей. Абсолютна шорсткість має розмірність довжини і частіше задається в міліметрах.

Для характеристики впливу шорсткості на гідравлічний опір іноді вводять поняття відносної шорсткості ϵ , що являє собою відношення абсолютної шорсткості до деякого лінійного розміру, що характеризує потік, наприклад до діаметра або радіусу труби. Відносна шорсткість є безрозмірною величиною:

$\epsilon = \Delta/d$. У деяких випадках уводиться поняття відносної гладкості. Це величина, зворотна відносної шорсткості: $\epsilon' = d/\Delta$.

Розмір шорсткості стінок трубопроводів визначає величину втрат на тертя, що обумовлюється гальмуванням рідини біля стінки і значним її закручуванням. Чим менше діаметр труби, тим швидше частки рідини зроблять пробіг від центра трубопроводу до стінок тим швидше зустрінуться з її нерівностями і викликають збурювання потоку. Отже, імовірність вихороутворення при малих діаметрах труб більша і вплив шорсткості на характер руху рідини виявляється сильніше.

Експериментально встановлена досить складна залежність між шорсткістю стінок труб і характером течії рідини. Можливі два варіанти механізму взаємодії потоку рідини зі стінками:

1.Значення абсолютної шорсткості менше товщини приграничного ламінарного шару (плівки), тобто $\Delta < \delta$. При цьому нерівності стінок цілком покриті ламінарною плівкою, і турбулентна частина потоку (його ядра) не стикається з ними, втрати енергії на тертя не залежать від шорсткості стінок, а визначаються лише властивостями рідини. Такі труби є гідравлічно гладкими (рис.6, а).

2.Значення абсолютної шорсткості більше товщини приграничного ламінарного шару ($\Delta > \delta$). У цьому випадку нерівності стінок будуть виступати з приграничної ламінарної плівки в турбулентну область, підсилюючи безладність руху в ядрі потоку й істотно збільшуючи втрати енергії. Маємо гідравлічно шорсткі поверхні труб.

Товщина приграничного шару непостійна і залежить від ряду факторів, що враховуються числом Рейнольдса. Зі збільшенням числа Рейнольдса товщина приграничного ламінарного шару зменшується і виступи, що раніше знаходилися під цим шаром, починають виходити з нього в турбулентну зону. Отже, та сама стінка в залежності від значення числа Рейнольдса може виявляти себе різним чином: в одному випадку як гладка, а в іншому — як шорстка.